

Hochtemperaturverhalten von hochfestem Leichtbeton

Untersuchungsbericht

erstattet von

Dr.-Ing. U. Diederichs

Juli 1993

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Untersuchung im Auftrag der Lias-Franken Leichtbaustoffe GmbH
D-91352 Hallerndorf-Pautzfeld

INHALTSÜBERSICHT

1. Einleitung

2. Versuchsprogramm

2.1 Referenzversuche

2.2 σ - ϵ -Versuche

2.3 Warmkriechversuche

2.4 Zwängungsversuche

2.5 Thermische Ausdehnung

2.6 Orientierende Untersuchungen zum Abplatzverhalten

3. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

3.1 Versuchsdurchführung

3.2 Referenzversuche bei Raumtemperatur

3.3 Hochtemperaturuntersuchungen

3.3.1 σ - ϵ -Untersuchungen

3.3.2 Thermische Dehnung

3.3.3 Warmkriechversuch

3.3.4 Zwängungsversuche

3.3.5 Zwängungsversuche bei schneller Aufheizung

4. Zusammenfassung

5. Literaturhinweise

1. Einleitung

Es ist geplant, beim Bau von Off-Shore-Plattformen zukünftig für bestimmte Bauteile hochfesten Leichtbeton einzusetzen. Auch diese Bauteile müssen für den Katastrophenlastfall "Brand" dimensioniert werden, wofür die Kenntnis der entsprechenden Materialkennwerte erforderlich ist.

Das Hochtemperaturverhalten von normalfestem Leichtbeton ist, soweit für die brandtechnische Dimensionierung von Bauteilen erforderlich, bereits erforscht worden [1]. Demgegenüber liegen keine abgesicherten Daten über das Verhalten von hochfestem Leichtbeton vor. Bisher durchgeführte orientierende Untersuchungen von hochfestem Normalbeton haben gezeigt, daß sich hochfeste Betone in ihrem Brandverhalten von normalfesten Betonen deutlich unterscheiden. Ursache hierfür sind die besonders hohe Dichtigkeit des Zementsteins und die höhere strukturelle Ausnutzung der Zementsteinfestigkeit als bei normalfesten Betonen (vgl. [2]). Aus diesen Gründen sind Schlußfolgerungen hinsichtlich des Verhaltens von hochfestem Leichtbeton bei hohen Temperaturen aus dem vorliegenden Datenmaterial - etwa im Sinne einer linearen Extrapolation - nicht möglich. Die benötigten Daten können also nur versuchstechnisch gewonnen werden.

In Abstimmung mit der Conoco Inc. wurden deshalb Versuche an zylindrischen Proben aus hochfestem Leichtbeton mit Liapor als Leichtzuschlag geplant. Folgende Versuche wurden als erforderlich angesehen:

- $\sigma\epsilon$ -Versuche im Temperaturbereich 20 °C bis 750 °C
- Warmkriechversuche im Temperaturbereich 20 °C bis 750 °C
- Bestimmung der thermischen Dehnung im Temperaturbereich 20 °C bis 1000 °C
- Zwängungsversuche im Temperaturbereich 20 °C bis 750 °C
- Zwängungsversuche mit hohen Aufheizgeschwindigkeiten zur Bestimmung der Abplatzneigung des Betons.

Die Versuchsparameter (Maximaltemperatur, Temperaturanstiegsgeschwindigkeiten, mechanische Belastung der Proben während der Temperierung) sollten nach [3,4] möglichst eng an die im Bauwerk zu erwartenden Belastungen (Hydrocarbonfeuer, T_{\max} rd. 1100 °C, hohe mechanische Belastung) angepaßt werden.

Da die Festigkeit fast aller Betone oberhalb von 750 °C auf verschwindend geringe Werte zurückgeht und der Versuchsaufwand sich bei Temperaturen oberhalb 750 °C drastisch erhöht, wurde für die geplanten Versuche als obere Grenztemperatur 750 °C gewählt. Lediglich bei der Ermittlung der thermischen Dehnung soll bis zum Einsetzen starker Sintervorgänge bzw. dem Einsetzen des Schmelzens der Zementsteinphase, die bei Temperaturen zwischen 950 °C und 1000 °C zu erwarten sind, aufgeheizt werden.

Als Proben sollten aus einem Betonblock ausgebohrte Zylinder (\varnothing 80 mm bzw. \varnothing 150 mm und $l = 300$ mm) verwendet werden. Die Proben entsprechen damit hinsichtlich Form und Mindestabmessung den von dem Rilem Committee [4] aufgestellten Anforderungen.

Die Herstellung des Betonblocks sowie das Ausbohren der Bohrkerns und die Versendung der Proben zum Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz nach Braunschweig sollte durch Norwegian Contractors erfolgen. Die Ausrüstung der Proben mit Thermoelementen und das planparallele Schleifen der Probekörperdruckflächen erfolgten im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz.

2. Versuchsprogramm

Nach Abstimmung mit der Firma Conoco Inc. sollten die nachfolgend aufgelisteten Versuche durchgeführt werden.

2.1 Referenzversuche

Referenzversuche sollten an drei Bohrkernen (\varnothing 150 mm, $l = 300$ mm) durchgeführt werden. Nach Bestimmung der Druckfestigkeit und des E-Moduls (an den Zylindern) sollten die Proben bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz zur Ermittlung des Gehalts an verdampfbarem Wasser getrocknet werden.

2.2 σ - ϵ -Versuche

σ - ϵ -Versuche sollten an rd. 12 Proben bei folgenden Temperaturen durchgeführt werden:

20 °C,	Referenzversuche,	drei Zylinder
100 °C,		ein Zylinder
150 °C,		ein Zylinder
200 °C,		ein Zylinder
250 °C,		ein Zylinder
350 °C,		ein Zylinder
450 °C,		ein Zylinder
550 °C,		ein Zylinder
650 °C,		ein Zylinder
750 °C,		ein Zylinder.

Die Versuche sollten wie folgt durchgeführt werden:

- Einbau der Proben in die Prüfmaschine, dreimalige Belastung bis zu rd. einem Drittel der erwarteten Bruchlast zur Bestimmung des E-Moduls.
- Aufheizen der Proben mit geringer Last (rd. 0,2 N/mm²) mit zwei K/min auf die angegebene Versuchstemperatur.
- Zweistündige thermische Homogenisierung der Proben, dreimalige Belastung mit rd. einem Drittel der erwarteten Bruchlast zur Bestimmung des E-Moduls bei hohen Temperaturen.
- Durchführung eines verformungsgesteuerten σ - ϵ -Versuchs bis zum Bruch der Proben.

2.3 Warmkriechversuche

An insgesamt acht Proben sollten Kriechversuche mit folgenden Anfangsbelastungen durchgeführt werden:

0,0 x σ_{ult}
 0,10 x σ_{ult}
 0,20 x σ_{ult}
 0,30 x σ_{ult}
 0,40 x σ_{ult}
 0,50 x σ_{ult}
 0,60 x σ_{ult}
 0,70 x σ_{ult} .

σ_{ult} bedeutet hier die in den Referenzversuchen unter 2.2 bestimmte Bruchlast bei 20 °C. Pro Anfangsbelastung sollte ein Zylinder (\varnothing 80 mm, l = 300 mm) geprüft werden.

Die Versuche wurden wie folgt durchgeführt:

- Einbau der Proben in die Prüfmaschine, dreimalige Belastung zur Bestimmung des E-Moduls.
- Belastung der Proben mit dem o. g. Belastungsgrad.
- Aufheizung der Proben mit 2 K/min unter Aufrechterhaltung der Anfangsbelastung auf 750 °C bzw. bis zum Einsetzen des Probekörpersversagens.

2.4 Zwängungsversuche

An insgesamt drei zylindrischen Proben (\varnothing 80 mm, l = 300 mm) sollten Zwängungsversuche mit folgenden Anfangsbelastungen durchgeführt werden:

$$\begin{aligned} &0,15 \times \sigma_{ult} \\ &0,30 \times \sigma_{ult} \\ &0,45 \times \sigma_{ult} \end{aligned}$$

Die Versuche sollten wie folgt durchgeführt werden:

- Einbau der Proben in die Prüfmaschine, dreimalige Belastung zur Bestimmung des E-Moduls.
- Belastung der Proben mit den angegebenen Belastungsgraden.
- Messung der Verformung unter den angegebenen Belastungsgraden.
- Aufheizung der Proben unter Konstanthaltung der Anfangsbelastung mit 2 k/min bis auf 750 °C.

2.5 Thermische Ausdehnung

Die thermische Ausdehnung sollte an einem zylindrischen Probekörper (\varnothing 80 mm, l = 300 mm) durchgeführt werden. Der Versuch wurde wie folgt durchgeführt:

- Einbau der Probe in die Prüfmaschine, dreimalige Belastung und Entlastung zur Bestimmung des E-Moduls bei 20 °C.
- Aufheizung der Probe bis 950 °C (ggf. auch etwas höher).
- Messung der thermischen Dehnung.

Der Probekörper sollte im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz mit axialen und radialen Bohrungen versehen werden, in die Thermoelemente zur Bestimmung des Temperaturgradienten im Probekörper eingesetzt werden.

2.6 Orientierende Untersuchungen zum Abplatzverhalten

An drei Probekörpern sollte orientierend die Abplatzsensivität des Betons untersucht werden. Hierzu wurden Proben mit \varnothing 150 mm, $l = 300$ mm wie in den unter 2.4 beschriebenen Zwängungsversuchen mechanisch beansprucht, jedoch mit der maximal von der Versuchsanlage erreichbaren Aufheizgeschwindigkeit (rd. 30 K/min) erwärmt. Vorgesehen war es, die Proben bei folgenden Anfangsbelastungen zu untersuchen:

$$0,15 \times \sigma_{ult}$$

$$0,30 \times \sigma_{ult}$$

$$0,45 \times \sigma_{ult}$$

Die Probekörper wurden ebenfalls im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz zur Messung der Temperaturverteilung während der Aufheizungen mit Thermoelementen ausgerüstet.

3. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Am 16. Oktober 1991 wurden im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz sechs zylindrische Proben (\varnothing 150 mm) und 28 zylindrische Proben (\varnothing 84 mm) aus Norwegen angeliefert. Diese Zylinder waren aus einem größeren Betonblock ausgebohrt worden und hatten eine Länge von ca. 400 mm. Aus Übersichtsgründen wurden die Proben kontinuierlich mit den Bezeichnungen LL1 ... LL6 (Bohrkern \varnothing 150 mm) bzw LL 7 ... LL 34 (Bohrkerne \varnothing 80 mm) versehen und mit wassergekühlter Diamantsäge auf rd. 300 mm gekürzt. Anschließend wurden die Zylinderstirnflächen planparallel geschliffen und bis zur Durchführung der Versuche in der Versuchshalle bei rd. 20 °C und 65 % r.F. gelagert. Bei Beginn der Versuche waren die Proben rd. 90 Tage alt.

3.1 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuche standen im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz zwei servohydraulische Hochtemperaturprüfstände zur Verfügung (vgl. Bild 1 und 2); eine mit einer maximalen Prüfkraft von 400 kN und eine mit einer maximalen Prüfkraft von 1000 kN. Die 400 kN-Prüfmaschine wurde zur Prüfung der Zylinder mit \varnothing 84 mm eingesetzt, die 1000 kN Prüfmaschine für die \varnothing 150 mm Bohrkerne.

Die Prüfmaschinen bestehen aus stabilen Rahmen, die zusammen mit dem servohydraulisch geregelten Zylindern für die maximalen Prüfkraft von 400 bzw. 1000 kN ausgelegt sind. Die Kraftmessung erfolgt jeweils mit Hilfe einer Ringtorsionskraftmeßdose (Nennkraft 400 bzw. 1000 kN, Gesamtfehler bezogen auf die Nennkraft $\leq \pm 0,02$ %; genauer als Güteklasse I nach DIN 51 220).

Bei der 400 kN-Prüfmaschine wurden die Verformungen jeweils mit Hilfe von zwei Dilatometern (bestehend aus einer temperaturbeständigen Klemmvorrichtung, zwei Zerodurstäben, einem Parallelenkersystem und einem induktiven Wegaufnehmer mit angeschlossenen Trägerfrequenzmeßverstärker) gemessen. Die Meßstrecke liegt symmetrisch zur Probekörpermitte und hat eine Länge von 200 mm. Die Meßergebnisse sind somit frei von Randeinflüssen. Bei den Versuchen mit der 1000 kN-Prüfmaschine wurde ein ähnlich aufgebautes Dilatometersystem verwendet. Die Verformungen wurden jedoch nur an den Zylinderstirnflächen abgegriffen.

Die Beheizung der Proben erfolgte über elektronisch geregelte 3-Zonen-Kammeröfen. Die Temperaturen wurden jeweils auf den Mantelflächen der Proben im Abstand von ca. 3 cm von den oberen bzw. unteren Probenstirnflächen und in der Mitte mit Eisen-Konstantan-Thermoelementen (nach DIN 43 710) gemessen und mit Hilfe von Kompensationsschreibern aufgezeichnet.

Zur Bestimmung des Temperaturprofils in den Zylindern mit \varnothing 150 mm, die mit der maximal von der Versuchsanlage erreichbaren Aufheizgeschwindigkeit erhitzt werden sollten, wurden senkrecht in den Stirnflächen 10 cm tiefe, 5 mm starke Bohrungen eingebracht (siehe Bild 3), in die Thermoelemente eingesetzt wurden. Die Bohrlöcher wurden anschließend, ebenso wie die Nut zum seitlichen Herausführen der Thermoelemente, mit Schnellzement verschlossen.

Die Durchführung der einzelnen Versuche erfolgte ansonsten wie im Kapitel 2 beschrieben.

3.2 Referenzversuche bei Raumtemperatur

An bauseits hergestellten und geprüften Würfeln ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) wurden folgende Festigkeiten ermittelt:

7-Tage-Festigkeit : 70 N/mm²
 28-Tage-Festigkeit : 82 N/mm²

Drei Zylinder ($\varnothing 150 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$) wurden hinsichtlich Rohdichte, E-Modul und Druckfestigkeit bei 20 °C geprüft. Die entsprechenden Prüfprotokolle sind in den Anlagen 3 und 4 und die σ - ϵ -Linien, die zur Bestimmung der E-Moduln und der Spannungsdehnungslinien (gemäß DIN 1048) aufgenommen wurden, in den Anlagen 5 bis 10 wiedergeben.

Nach den Festigkeitsprüfungen wurden von den Proben (s. Bilder 4 bis 6) Bruchstücke entnommen und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Um entsprechende Kennwerte für die Proben mit einem Durchmesser von 84 mm zu gewinnen, wurden auch die Proben LL 7 und LL 8 bei Raumtemperatur hinsichtlich Rohdichte, Druckfestigkeit und Feuchtegehalt geprüft. Das entsprechende Versuchsprotokoll ist in Anlage 13 wiedergegeben.

Die wesentlichen Ergebnisse der Referenzuntersuchungen sind in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Rohdichte, E-Modul, Druckfestigkeit und Feuchtegehalt der hochfesten Leichtbetonproben.

Probenbezeichnung	Rohdichte kg/dm ³	E-Modul kN/mm ²	Druckfestigkeit N/mm ²	Feuchtegehalt Masse-%
$\varnothing 150 \text{ mm}$				
LL 1	1,979	23,8	65,2	9,26
LL 2	1,966	23,7	61,6	8,45
LL 3	1,967	23,7	61,1	8,97
Mittelwerte	1,971	23,7	62,6	8,89
$\varnothing 84 \text{ mm}$				
LL 7	1,950	-	65,5	8,98
LL 8	1,941	-	61,5	9,17
Mittelwerte	1,946	-	63,5	9,08

3.3 Hochtemperaturuntersuchungen

3.3.1 σ - ϵ -Untersuchungen

Die Ergebnisse der einzelnen σ - ϵ -Versuche sind in den Anlagen 14 bis 18 (s. Bilder 7 bis 15) wiedergegeben.

Den Bildern kann entnommen werden, daß die σ - ϵ -Linien bis zu Versuchstemperaturen von 250 °C fast bis unmittelbar vor dem Einsetzen des Probenbruchs linear verlaufen, ohne daß sich der Bruch - beispielsweise durch Abflachen der Kurven - ankündigt. Der Bruch trat bei diesen Versuchen auch stets ohne Ankündigung, verbunden mit einem lauten Knall, ein. Die Regelungsgeschwindigkeit der Servohydraulik war offenbar nicht ausreichend, um bei einsetzendem Bruch die auf den Probekörper einwirkenden Lasten schnell genug herabzuregeln und dadurch die Zerstörung der Proben zu vermeiden.

Ab 350 °C beginnt sich der Bruch durch Einschwenken der σ - ϵ -Linie in die Horizontale anzukündigen (siehe Bild 11) gleichzeitig steigt die Bruchstauchung von rund 4 ‰ im Temperaturbereich 20 bis zu Temperaturen von 250 °C auf 5 ‰ an.

Bei 400 °C und darüber haben die σ - ϵ -Linien deutliche horizontale Tangenten, und das Versagen war so weich, daß auch Teile des abfallenden Astes der σ - ϵ -Linien aufgenommen werden konnten (siehe Bilder 12 bis 15).

Hinsichtlich des Bruchverhaltens wurde folgendes beobachtet: Bei Temperaturen bis zu 250 °C verlaufen die Bruchflächen stets auch durch die groben Leichtzuschläge (siehe Bild 18). Bei den höheren Temperaturen verlaufen die entsprechenden Brüche hauptsächlich in der Matrix und die Zuschläge bleiben ganz.

Eine Zusammenstellung der gemessenen Festigkeitswerte und E-Moduln ist in der nachfolgenden Tabelle 2 sowie in den Bildern 16 und 17 (vergleiche Anlage 18 und Anlage 19) wiedergegeben.

Tabelle 2: Ergebnisse der mit den zylindrischen Proben (\varnothing 84 mm, $l = 300$ mm) durchgeführte σ - ϵ -Versuche bei hohen Temperaturen

Probenbezeichnung	Temperatur °C	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul kN/mm ²
LL 7	20	65,5	23,7
LL 8	20	61,5	23,7
LL 9	100	60,6	18,0
LL 10	150	48,0	15,6
LL 11	200	54,5	23,5
LL 12	250	43,8	19,5
LL 13	350	50,2	12,4
LL 14	450	34,7	11,0
LL 15	550	26,2	8,7
LL 16	650	21,5	8,7
LL 17	750	16,6	6,3
LL 28	912	4,7	-
LL 34	150	52,9	16,6

Der Tabelle bzw. den Bildern ist zu entnehmen, daß der Beton im Temperaturbereich 150 bis 250 °C ein Minimum durchläuft, ebenso der E-Modul. Oberhalb dieser Temperaturen ist zunächst mit einem Wiederanstieg der Festigkeit zu rechnen, anschließend nehmen sowohl Festigkeit als auch E-Modul monoton mit der Versuchstemperatur ab. Bei 900 °C beträgt die Festigkeit immerhin noch 4,7 N/mm², was rund 7,5 % der Ausgangsfestigkeit bei 20 °C entspricht.

3.3.2 Thermische Dehnung

Die thermische Dehnung wurde an zwei Probekörpern, und zwar einmal bis zu einer maximalen Temperatur von 780 °C (vergl. Bild 19) und einmal bis zu einer maximalen Temperatur von 915 °C (siehe Bild 20) ermittelt.

Den Bildern ist zu entnehmen, daß die thermische Ausdehnung mit fast waagerechter Tangente im Temperaturbereich 20 bis etwa 60 °C verläuft. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich in dem Probekörper aufgrund der hohen thermischen Isolation der Leichtzuschläge erst langsam ein stationärer Temperaturgradient aufbaut.

An diesen Bereich schließt sich ein relativ starker Anstieg der thermischen Ausdehnung der Proben an, der oberhalb von 150 °C wieder abflacht. Der hohe Anstieg ist mit der in diesem Temperaturbereich im Beton noch vorhandenen Feuchtigkeit zu begründen.

Das sich daran anschließende Abflachen der Kurve wird durch die entsprechenden Schwindverkürzungen der Zementsteinmatrix infolge der Freisetzung des Wasserdampfs verursacht. Diese Schwindverkürzungen werden nur leicht durch die thermische Ausdehnung des Feststoffskeletts überkompensiert, so daß das netto nur sehr geringe thermische Dehnungen auftreten.

Im Temperaturbereich von etwa 160 bis rund 570 °C erfolgt wiederum ein linearer Anstieg der thermischen Ausdehnung des Betons.

Oberhalb 580°C ist dann nochmal eine stärkere thermische Ausdehnung zu verzeichnen. Diese resultiert aus der spontanen Umwandlung der quarzhaltigen Sandzuschläge, wobei sich die Quarzkörner spontan von der α -Modifikation in die β -Modifikation umwandeln.

Oberhalb von rund 700 °C sind diese Vorgänge abgeschlossen und die thermische Dehnung steigt weiter leicht bis zu Temperaturen von rund 860 °C an. Oberhalb von 860 °C setzen in der Zementsteinphase Sintervorgänge ein, die zu einer Verkürzung der Proben führen.

Insgesamt dehnen sich die Proben bei der Aufheizung von 20 °C auf 850 °C auf rund 9,5 % aus.

Hervorzuheben ist, daß die mit den beiden unterschiedlichen Proben gemessenen thermischen Ausdehnungen nur in sehr geringen Maße voneinander abweichen.

3.3.3 Warmkriechversuch

Die Ergebnisse der Warmkriechversuche sind in Anlage 22 (siehe Bilder 22 und 23) wiedergegeben. Den Darstellungen kann man entnehmen, daß bis zu Belastungsgraden von 30 % (der bei 20 °C gemessenen Kurzzeitfestigkeit) während der Aufheizung bis maximal 760 °C kein Bruch der Proben erfolgte. Dagegen versagte die mit 40 % belastete Probe nach Überschreitung von 660 °C.

Die mit 50 bzw. 60 % der Kurzzeitfestigkeit belasteten Proben versagten im Temperaturbereich 160 °C bis 540 °C. Hierbei sind selbst bei ein und demselben Belastungsgrad stark unterschiedliche Versuchsergebnisse gewonnen worden (siehe Bilder 22 und 23). Offenbar ist es so, daß das bei den σ - ϵ -Versuchen festgestellte Festigkeitstief zwischen 150 und 200 °C dieses Verhalten mit beeinflußt. Die Proben, deren individuelle Festigkeit gerade so hoch ist, daß sie das Festigkeitstief bei der belasteten Aufheizung durchschreiten können, ohne daß sie versagen, stabilisieren sich wieder und brechen dann erst bei deutlich höheren Temperaturen; beispielsweise erst oberhalb von 540 °C (bei 50 %iger Belastung). Dagegen bricht die gleichermaßen belastete Probe mit etwas geringerer individueller Festigkeit beim Durchschreiten dieses Festigkeitstiefs (bei 160 °C, bei der zweiten mit 50 % belasteten Probe).

Aus den gewonnenen Versuchsdaten wurden nach der folgenden Formel (1) die auf den Belastungsgrad α bezogenen transienten Kriechverformungen $\tilde{\epsilon}$ (= normalized transient strain) berechnet.

$$\tilde{\epsilon} = (\epsilon_{\text{tot}} - \epsilon_{\text{el},i} - \epsilon_{\text{th}}) / \alpha \quad (1)$$

In der Gleichung (1) bedeuten: ϵ_{tot} = Gesamtverformung, $\epsilon_{\text{el},i}$ = elastische Anfangsverformung und ϵ_{th} = thermische Ausdehnung, α = Druckspannung während des instationären Kriechversuchs/Bruchspannung bei 20 °C.

Dem Bild 24 kann man entnehmen, daß die Proben, die mit 20, 30 und 40 % ihrer Kurzzeitfestigkeit aufgeheizt worden sind, praktisch identische, bezogene instationäre Kriechverformungen aufweisen, während der Probekörper, der mit nur 10 % Belastung aufgeheizt wurde, offenbar stärkere bezogene Kriechverformungen zeigt.

Die im Bild 25 dargestellten Kriechverformungen sind im Temperaturbereich bis 180 °C nahezu identisch mit den Verformungen der bei 20, 30 und 40 % belasteten Proben, so daß die etwas von dem Mittelwert abweichenden Kurven offenbar Exemplarstreuungen darstellen.

Die bezogenen Kriechverformungen lassen i. W. vier Phasen erkennen: Im Temperaturbereich bis etwa 60 °C ist das transiente Kriechen offenbar verschwindend gering; im Temperaturbereich 60 °C bis ungefähr 160 °C nehmen die transienten Kriechverformungen mit dem Temperaturanstieg vergleichsweise stark zu. Nach Abklingen der Austrocknungsvorgänge ab etwa 180 °C ist dann ein weiterer, leichter, monotoner Anstieg der Kriechverformungen mit der Temperatur festzustellen. Da ab etwa 500 °C üblicherweise die Zersetzung des Portlandits beginnt und die Desintegration der Kalziumhydratsilikatphasen einsetzt, nehmen die Kriechverformungen oberhalb von 500 °C wiederum beschleunigt zu.

3.3.4 Zwängungsversuche

Die Ergebnisse der mit unterschiedlichen Anfangsbelastungen durchgeführten Zwängungsversuche sind im Bild 26 wiedergegeben.

In der ersten Phase der Aufheizung, etwa bis zu Temperaturen von 80 °C, steigen die Zwangskräfte nahezu linear mit der Temperaturerhöhung an. Ab 80 °C setzt offenbar mit der Entwässerung der Proben eine Relaxation ein; diese verstärkt sich beim Überschreiten von etwa 120 °C zunehmend. Die Zwangskräfte sinken dann monoton mit der Temperaturerhöhung immer weiter ab und erreichen bei etwa 300 °C nur noch rund 10 N/mm². Mit weiter ansteigender Temperatur gleichen sich auch die Zwangskräfte der mit unterschiedlicher Anfangsbelastung gezwängten Proben immer stärker an und sind ab etwa 400 °C im weiteren Verlauf identisch.

Auch aus den Zwangskraftverläufen wurden nach entsprechender Umformung der Gleichung (1) die normalisierten transienten Kriechverformungen errechnet. Die Ergebnisse zeigen, daß ähnlich wie bei den Warmkriechversuchen fast keine Abhängigkeit der transienten Kriechverformung von der Anfangsbelastung besteht und bis etwa 400 °C transiente Kriechverformungen in gleicher Größenordnung auftreten wie bei den Warmkriechversuchen. In dem sich daran anschließenden Temperaturbereich scheinen die normalisierten Kriechverformungen höher zu sein, was offenbar auch aus den hier vorhandenen sehr geringen Druckspannungen resultiert.

3.3.5 Zwängungsversuche bei schneller Aufheizung

Wie unter Kapitel 2.6 beschrieben, wurden 3 Probekörper mit \varnothing 150 mm wie bei den zuvor beschriebenen Zwängungsversuchen mechanisch belastet, jedoch mit der maximal von der Versuchsanlage erreichbaren Aufheizgeschwindigkeit erwärmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Bildern 28, 29 und 30 wiedergegeben. Aufgezeichnet sind jeweils über der Zeitachse im oberen Diagramm der gemessene Zwangskraftverlauf und darunter die im Zentrum der Probe, sowie die in 2 und 4 cm Tiefe (gemessen von der Oberfläche) ermittelten Temperaturen und die Oberflächentemperatur.

Den Diagrammen kann man entnehmen, daß die Aufheizgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Versuchsdauer zwischen 30 °C pro Minute und 10 °C pro Minute variieren. Die Probekörper, die mit 15 bzw. 30 % ihrer Kurzzeitfestigkeit

belastet waren, zeigten bereits 10 Minuten nach Beginn der Aufheizung ein mehr oder weniger kontinuierliches Absinken der Zwangskräfte, die bis auf ein Drittel bzw. die Hälfte der anfänglichen Last abfielen.

Der Probekörper, der mit 45 % seiner Kurzzeitfestigkeit belastet worden war, versagte relativ spröde, 8 Minuten nach Beginn der Beheizung.

4. Zusammenfassung

Die Firma Lias-Franken Leichtbaustoffe GmbH, Hallerndorf-Pautzfeld, beauftragte das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz mit der Untersuchung des Hochtemperaturverhaltens von hochfestem Leichtbeton.

Hierzu wurden dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz insgesamt sechs Leichtbetonproben mit \varnothing 150 mm und einer Länge von rund 300 mm sowie 28 Proben mit \varnothing 84 mm und einer Länge von 300 mm, die aus entsprechenden Betonblöcken ausgebohrt worden waren, übergeben.

An diesen Proben sollten nach entsprechender Vorbereitung (Ablängen der Proben und planparalleles Schleifen der Zylinderstirnflächen) die folgenden Versuche durchgeführt werden: Referenzversuche bei Raumtemperatur zur Bestimmung der Rohdichte und Druckfestigkeit sowie des E-Moduls bei 20 °C und des Feuchtegehalts durch Bestimmung des Gewichtsverlusts nach Austrocknung bei 105 °C, σ - ϵ -Versuche an unbelastet auf 100 bis 750 °C aufgeheizten Proben, Warmkriechversuche mit unterschiedlichen Belastungsgraden, Zwängungsversuche mit unterschiedlichen Anfangsbelastungen, Aufnahme der thermischen Dehnung des Betons bis zu Temperaturen von 920 °C sowie orientierende Untersuchungen zum Abplatzverhalten des Betons durch Zwängungsversuche mit schneller Aufheizung.

Die Versuche haben ergeben, daß die Festigkeit, die bei Raumtemperatur in der Größenordnung von 62 N/mm² lag, bereits bei leichter Erwärmung auf 150 °C ... 250 °C eine starke Abnahme um 30 % aufweist. Nach Durchschreiten dieses Festigkeitstiefs kommt es zu einer Festigkeitserholung, wobei etwa bei 300 °C fast wieder die Ausgangsfestigkeit erreicht wird. Im Verlaufe der weiteren Temperaturerhöhung nimmt die Festigkeit dann kontinuierlich bis auf Werte um rund 4,7 N/mm² bei 920 °C ab.

Die Abnahme des E-Moduls mit der Temperaturerhöhung ist stärker ausgeprägt als die der Festigkeit.

Die σ - ϵ -Versuche haben darüberhinaus ergeben, daß die Proben bis zu Temperaturen von rund 300 °C vergleichsweise spröde brechen und die σ - ϵ -Linien bis zum Probekörperversagen nahezu linear verlaufen. Oberhalb dieser Temperaturen versagen die Proben in einem höheren Maße duktil, und die σ - ϵ -Linien zeigen ausgeprägte waagerechte Tangenten vor dem Einsetzen des Bruchs.

Die thermische Ausdehnung des Betons betrug bei der Aufheizung von 20 °C auf etwa 750 °C 9,5 %. Bei Aufheizung auf höhere Temperaturen setzt oberhalb von 800 °C ein Schrumpfen der Proben infolge von Sintervorgängen im Zementstein ein.

Aus den gemessenen Warmkriechkurven wurden sogenannte bezogene transiente Kriechverformungen berechnet. Hierbei zeigte sich, daß diese Verformungen nahezu unabhängig vom Belastungsgrad ausfallen und daß das Kriechen in Abhängigkeit von der Temperatur vier Phasen aufweist: Bis zu Temperaturen von rund 80 °C tritt kein Kriechen auf, dann erfolgt ein relativ starkes Kriechen bis zu Temperaturen von rund 160 °C, was offenbar mit den dabei ablaufenden Entwässerungsvorgängen in Zusammenhang steht. Oberhalb von 160 °C vermindert sich das Kriechen wiederum, und erst mit einsetzender Portlanditersetzung ab rund 500 °C setzt dann wieder ein sich mit der Temperaturerhöhung verstärkendes transientes Kriechen ein.

Die Ergebnisse der Zwängungsuntersuchungen stützen die Ergebnisse der Kriechuntersuchungen. Im Temperaturbereich von 20 °C bis rund 80 °C zeigen die Proben praktisch keinerlei Relaxation. Die entsprechenden Zwangskräfte nehmen daher linear mit der Temperatur zu. Anschließend durchlaufen die Zwangskräfte ein Maximum, um dann kontinuierlich mit weiterer Temperaturerhöhung auf sehr kleine Werte abzufallen, wobei bei höheren Temperaturen kein Einfluß aus der anfänglichen Belastung mehr zu erkennen ist.

Die orientierenden Untersuchungen zum Abplatzverhalten, bei denen die Proben mit 15, 30 und 45 % ihrer Kaltdruckfestigkeit als Anfangsbelastung belastet wurden und mit maximal von der Versuchsanlage erreichbaren Aufheizgeschwindigkeit beheizt wurden, zeigten, daß der Leichtbeton keine Tendenz zum Auftreten explosiver Abplatzungen aufweist. Bei den Proben, die zu Beginn der Versuche mit 15 bzw. 30 % ihrer Kurzzeitfestigkeit belastet worden waren, sanken die

Zwängungsspannungen bereits kurz nach Beginn der Aufheizung monoton auf sehr kleine Werte ab. Der mit 45 % seiner Ausgangsfestigkeit belastete Probekörper brach 8 Minuten nach Beginn seiner Aufheizung. Dieses Versagen ist vermutlich auch auf den starken radialen Spannungsgradienten zurückzuführen, der, bedingt durch die hohe Isolationsfähigkeit des Materials, aus dem dadurch entstehenden starken Temperaturgradienten resultiert.

5. Literaturhinweise

- [1] Schneider, U.; Diederichs, U.; Rosenberger, W. & Weiß, R:
Hochtemperaturverhalten von Festbeton (High temperature behaviour of concrete),
Sonderforschungsbereich 148, Arbeitsbericht 1978 - 1980, Teil II, B3-1 - 142,
Technische Universität Braunschweig, 1980.
- [2] Diederichs, U.: Jumppanen, U.-M. & Penttala, V.:
Behaviour of high strength concrete at high temperatures, Helsinki University of
Technology, Department of Structural Engineering, Report 92. Espoo 1989, 76p.
- [3] Schneider, U. (Editor):
Properties of Materials at High Temperatures - Concrete. Report RILEM COMITTEE
44-PHT. Department of Civil Engineering, Gesamthochschule Kassel, 1985.
- [4] Schneider U. Editor:
Testing of Materials at High Temperatures - Concrete. Report RILEM COMITTEE
74-THT. Department of Civil Engineering, Gesamthochschule Kassel, 1990.

Bild 1: Übersichtsfoto vom
400-kN-Hochtemperaturprüfstand

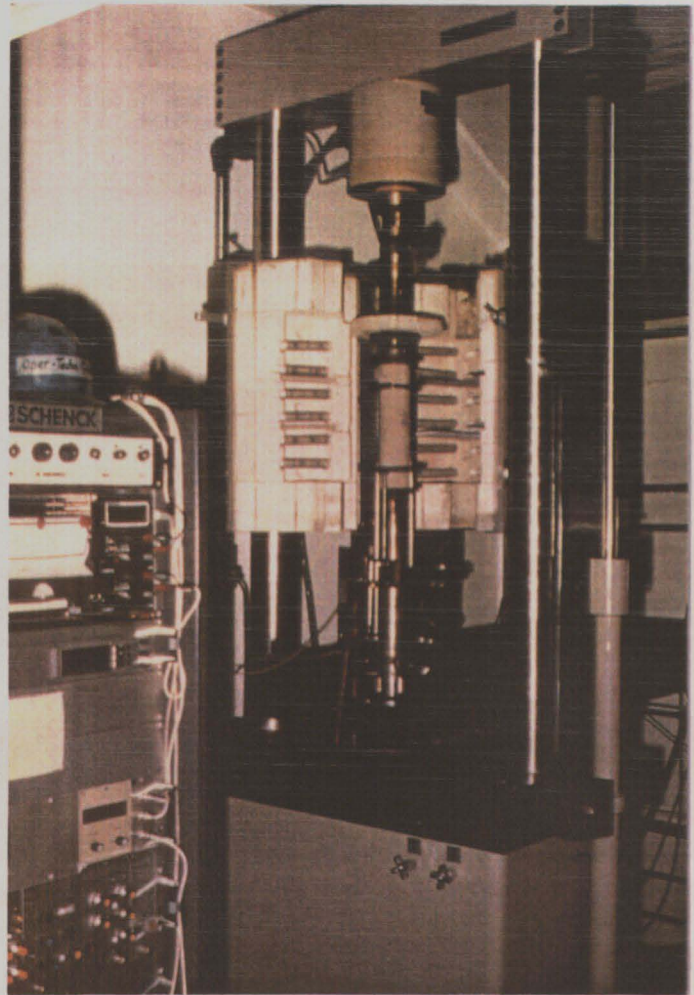
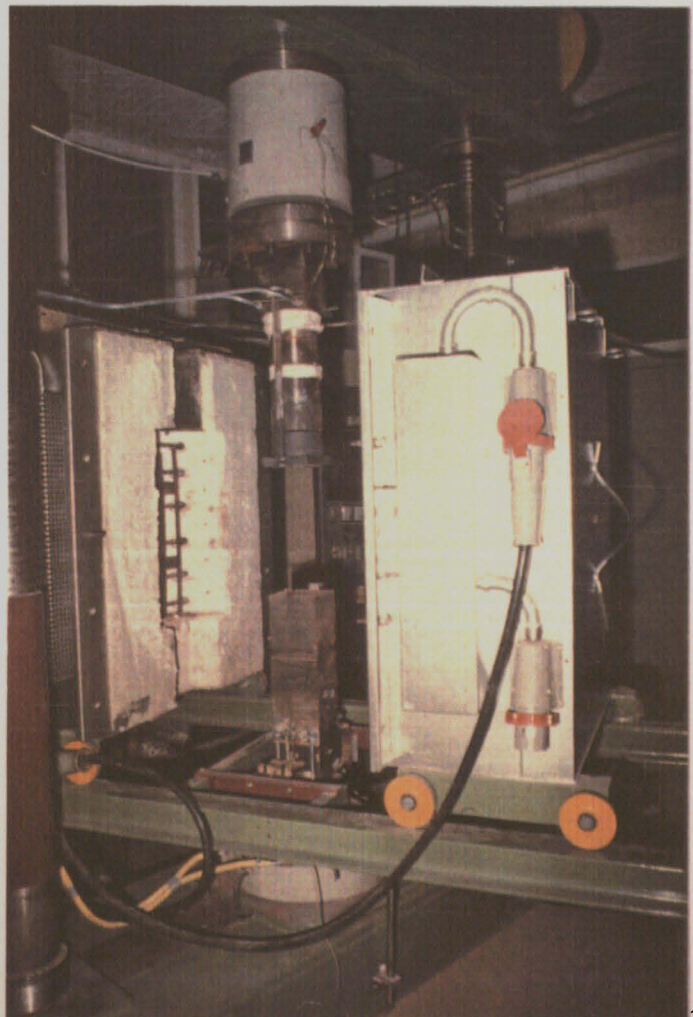


Bild 2: Übersichtsfoto vom
1000-kN-Hochtemperaturprüfstand



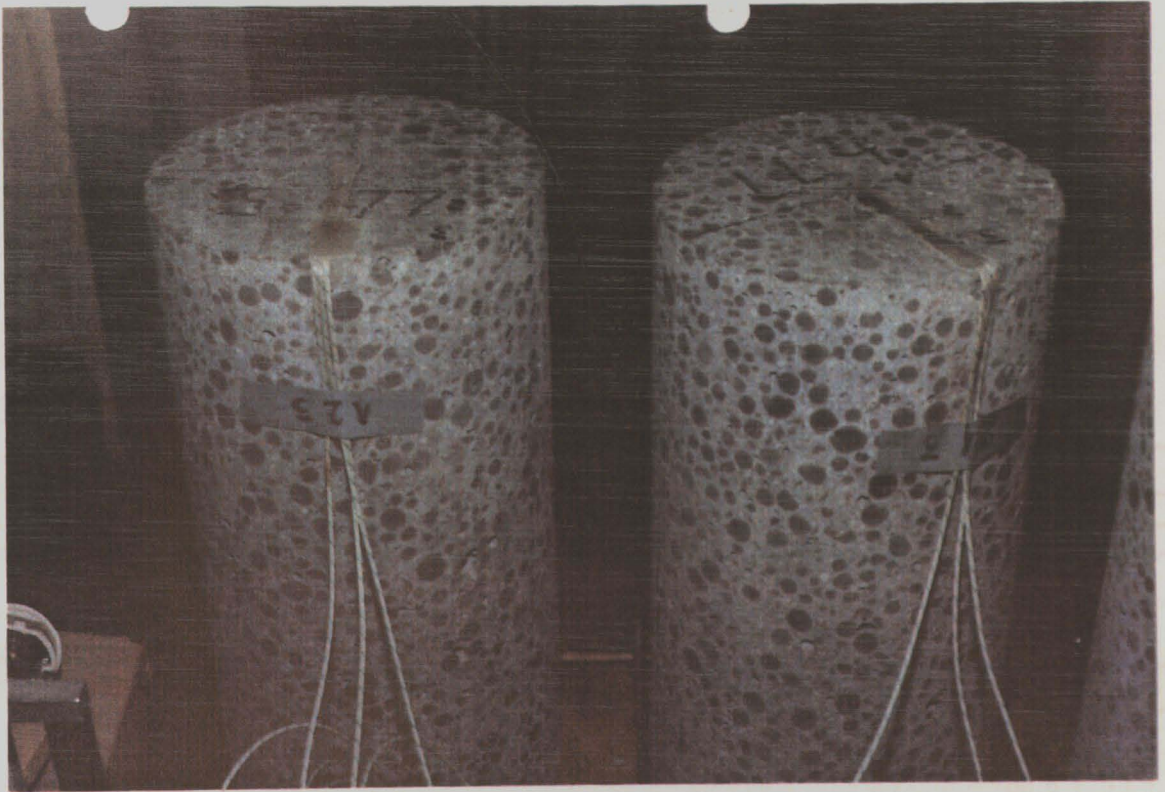


Bild 3: Für die Prüfung vorbereitete zylindrische Probekörper LL 4 und LL 5 mit eingebauten Thermoelementen

Antragsteller: Dr. Diederichs

Eintrag vom: 18. 10. 91

Versuchsmaterial: 3 Leichbeton 24 Linder

Ø 15 cm H 30 cm HSC LWA

Singana: 18. 10. 91

Kennzeichnung: LL 1 LL 2 LL 3

Bearbeitungs-Nr. 8762/8762

Prüfung: geprüft am: Prüfer

Abmessungen Hasse 18.10.91 ^{an} L

Rohdichte	4	2
-----------	---	---

E-Modal Durchfestig. " Fr

Feuchtigkeitsgehalt 31.10.91 Z

BETONPRÜFUNGEN

Art, Anzahl und Abmessungen (cm) der Prüfkörper	Würfel	Prismen	Balken	Zylinder	Platten
	10x10x10	15x15x70	10x15x70	3 · d15:h 30	10·20x12
	15x15x15	20x20x90	15x15x70	d15:h 35	
	20x20x20			d20:h 30	

Zylinder: Druckfestigkeit - Spaltzugfestigkeit - E-Modul - Schwinden - Kriechen

[illegible]

Prüfung im Alter von	(Tg)
Prüfung bei Versuchsbeginn	(VB)
Prüfung bei Versuchsdurchführung	(VD)
Prüfung bei Versuchsende	(VE)
Prüfung nach Angabe	(Angabe eintr.)

Prüfmaschine: W+B 2000 kN

Prüfer:

[illegible]

Hochtemperaturverhalten von hochfestem Leichtbeton Anlage 4

SECRET - INFO. :

Sachbearbeiter:

8762/8762

HSC LWA

BETONPRÜFUNGEN Filename: DIE-LL-1 DIE-LL-2 DIE-LL-3 Disc. Nr.: ABC 15.

Art, Anzahl und Abmessungen (cm) der Prüfkörper	Würfel	Prismen	Balken		Zylinder	Platten	
	10x10x10	15x15x70	10x15x70	3	d15:h 30	20x20x12	
	15x15x15	20x20x90	15x15x70		d15:h 35		
	20x20x20				d20:h 80		

Platten: Wasserundurchlässigkeit

[illegible]

Prismen: Druckfestigkeit - E-Modul

[illegible]

Balken: Biegezugfestigkeit

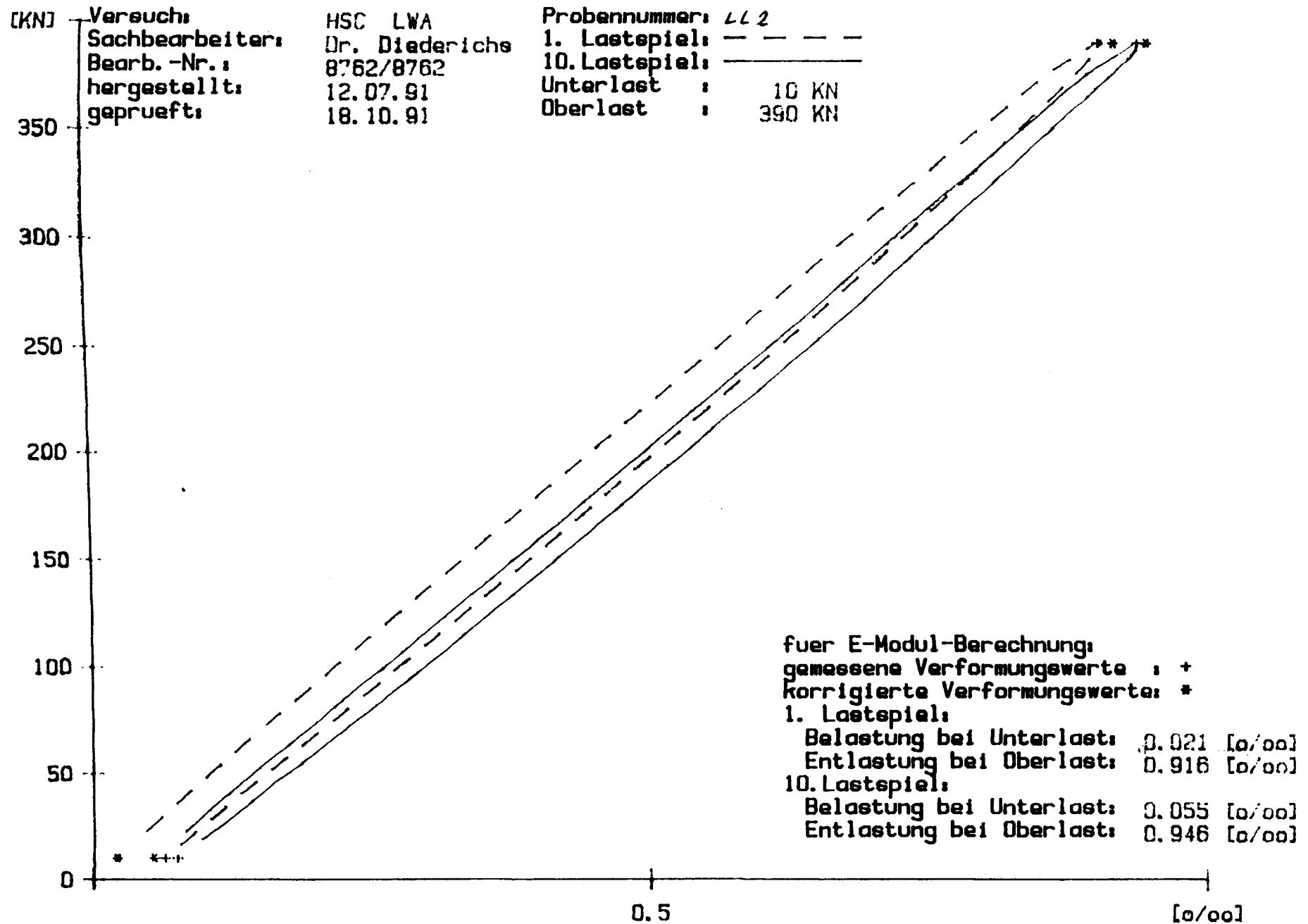
[illegible]

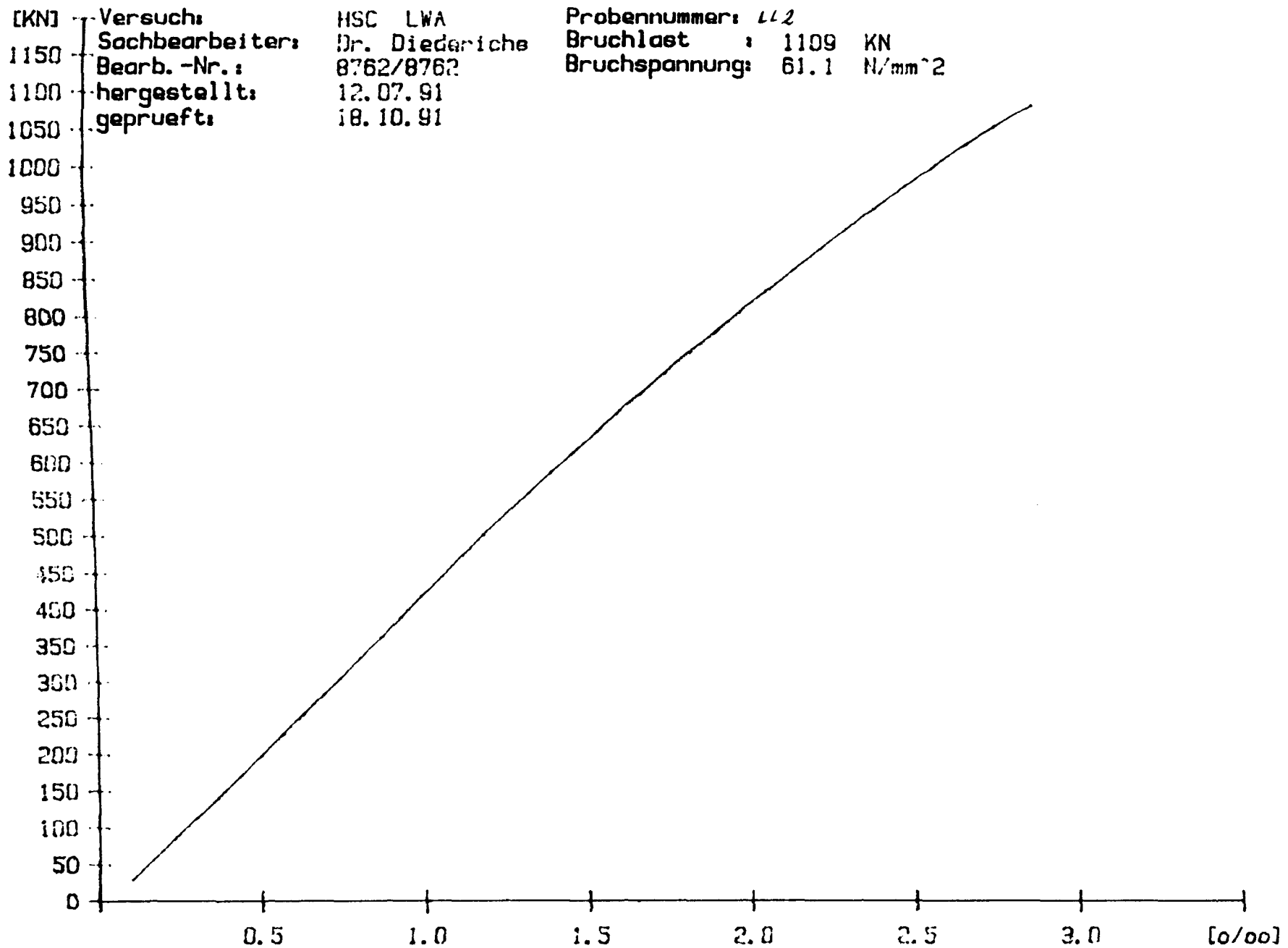
Zylinder: Druckfestigkeit - Spaltzugfestigkeit - E-Modul - Schwinden - Kriechen

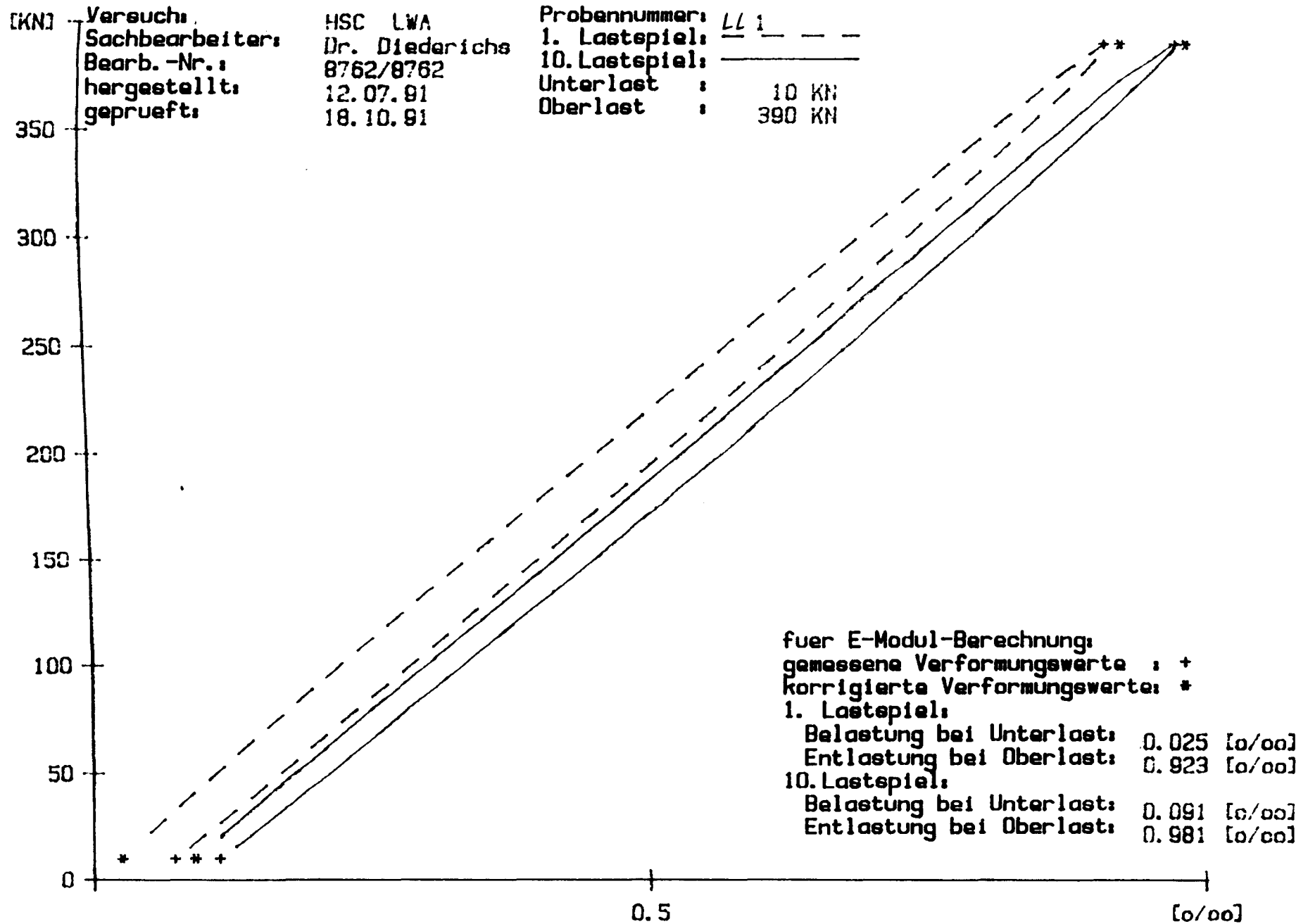
LL1					301	152	10811	1979	11839	652
LL2	12.07.91	18.10.91	98		302	152	10774	1966	11182	616
LL3					301	152	10741	1967	11089	611
								1971	11370	626

+) Prüfung im Alter von	(Tg)
Prüfung bei Versuchsbeginn	(VB)
Prüfung bei Versuchsdurchführung	(VD)
Prüfung bei Versuchsende	(VE)
Prüfung nach Angabe	(Angabe eintr.)

Prüfmaschine: WTB 2000 UN
Prüfer: 7



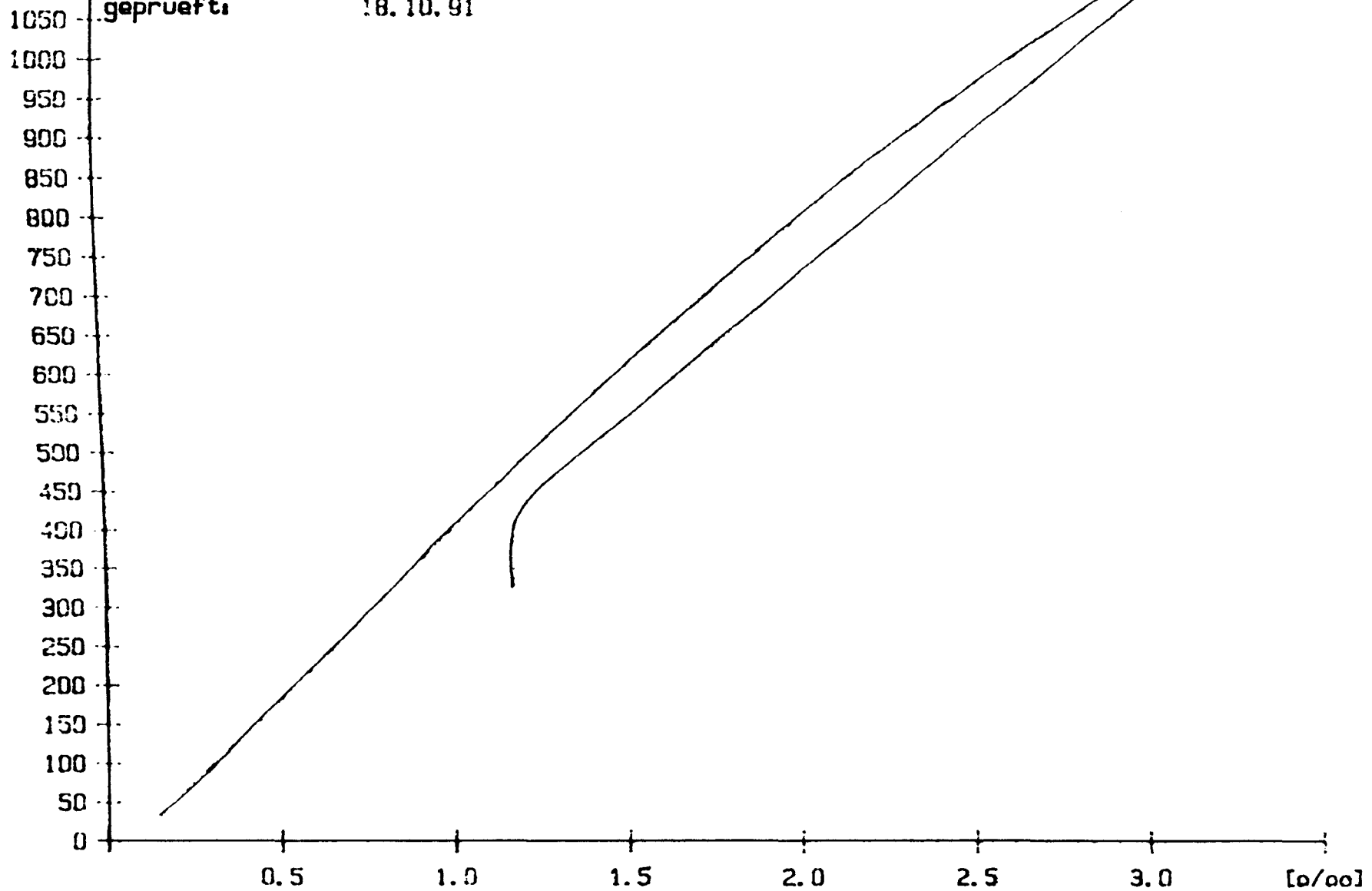


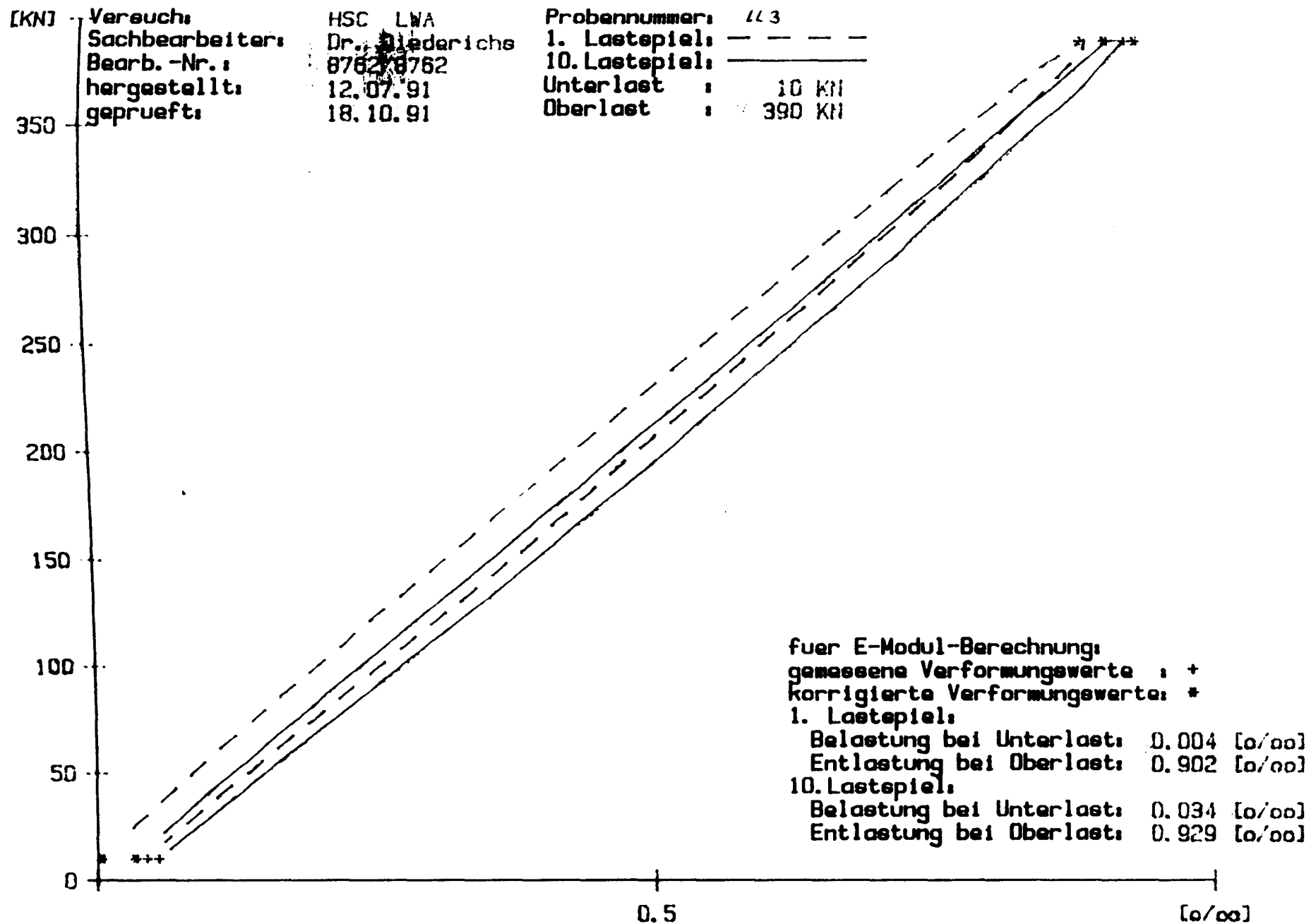


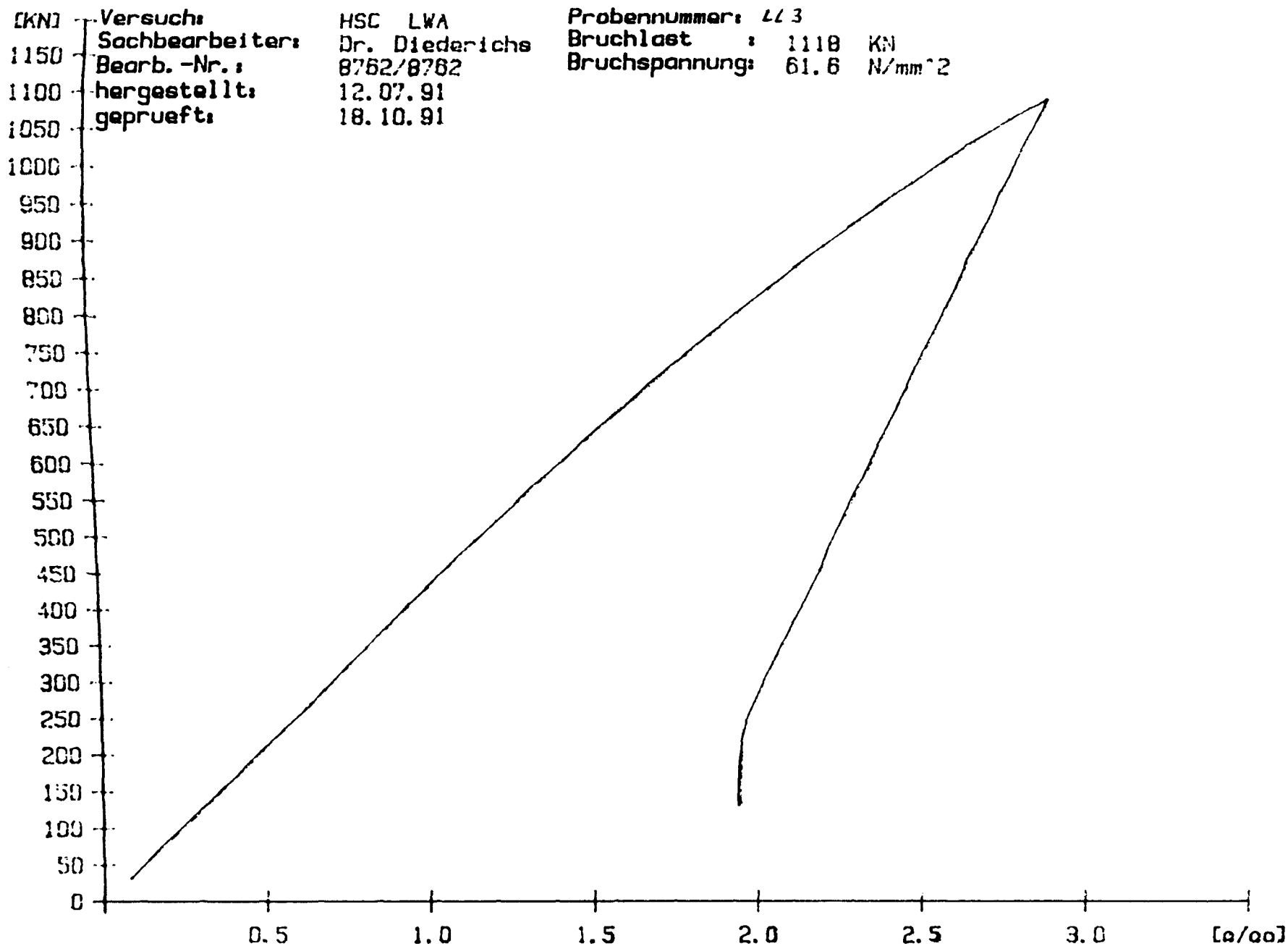
(KN) Versuch:
 Sachbearbeiter:
 Bearb.-Nr.:
 hergestellt:
 geprüft:

HSC LWA
 Dr. Diederichs
 8762/8762
 12.07.91
 18.10.91

Probennummer: LL1
 Bruchlast : 1184 KN
 Bruchspannung: 65.2 N/mm²







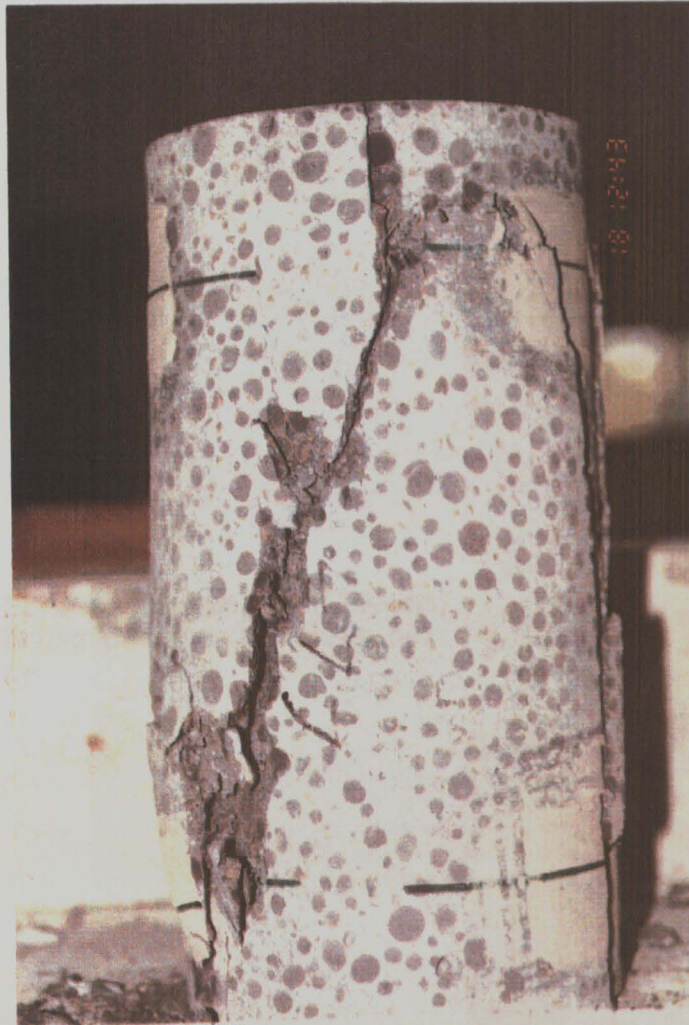


Bild 4: Probekörper LL 1 (\varnothing 150 mm, l = 300 mm) nach Durchführung des σ - ϵ -Versuchs bei Raumtemperatur



Bild 5:
Probekörper LL 2 (\varnothing 150 mm, l = 300 mm)
nach Durchführung des σ - ϵ -Versuchs bei
Raumtemperatur

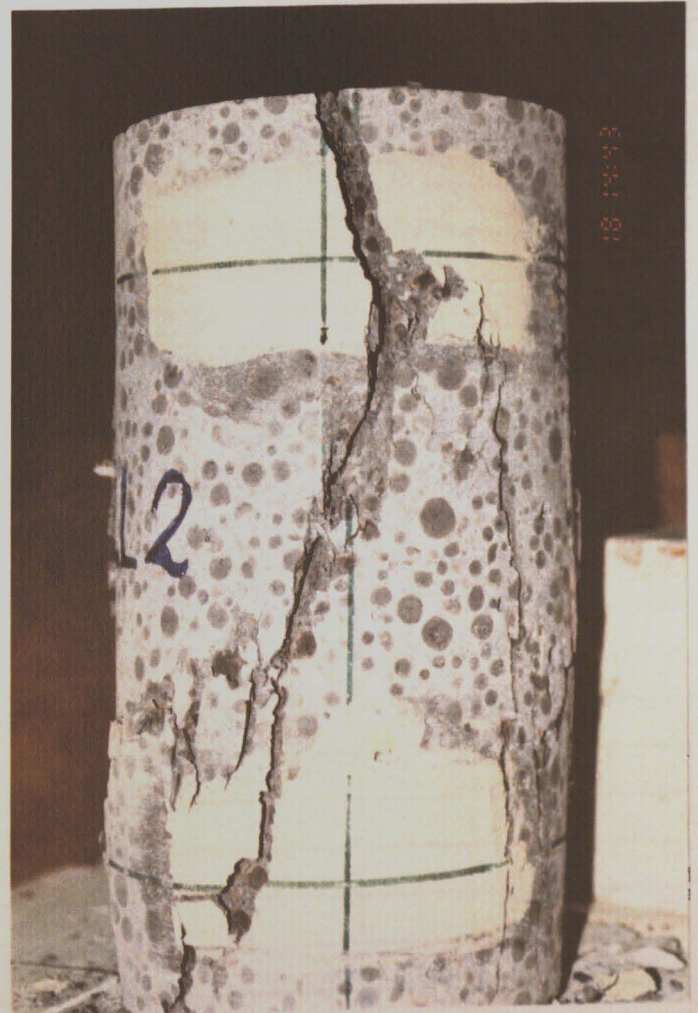


Bild 6:
Probekörper LL 3 (\varnothing 150 mm, l = 300 mm)
nach Durchführung des σ - ϵ -Versuchs bei
Raumtemperatur

Bearbeitungs-Nr.

Prüfung:

geprüft am Prüfer

Abmessungen, Hasse 14.10.91 Fr

Rohdichte 14.10.91 \bar{n}

Druckfestigkeit 15.10.91 Fr

Feuchtigkeitsgehalt 28.10.91 IV

Feuchtigkeitsgehalt (105°C)

<http://www.diglib.tu-bs.de/?docid=00062518>

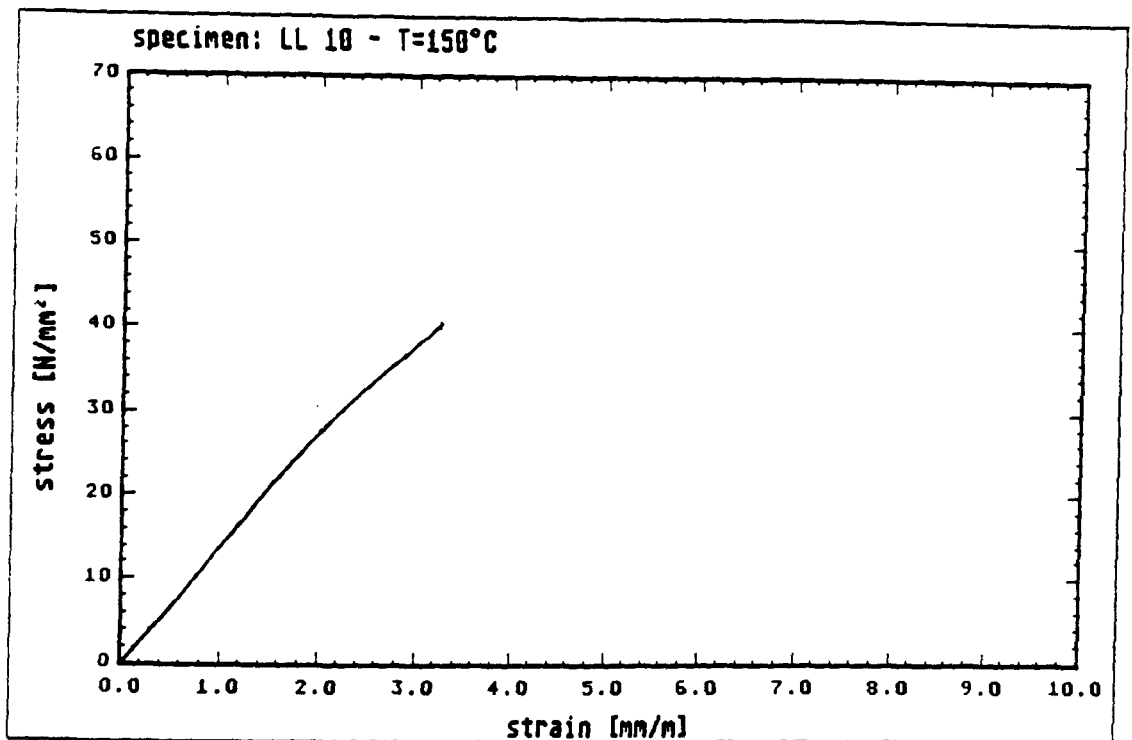


Bild 7: Bei 100 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbehandelt aufgeheizten Probekörpers LL 9

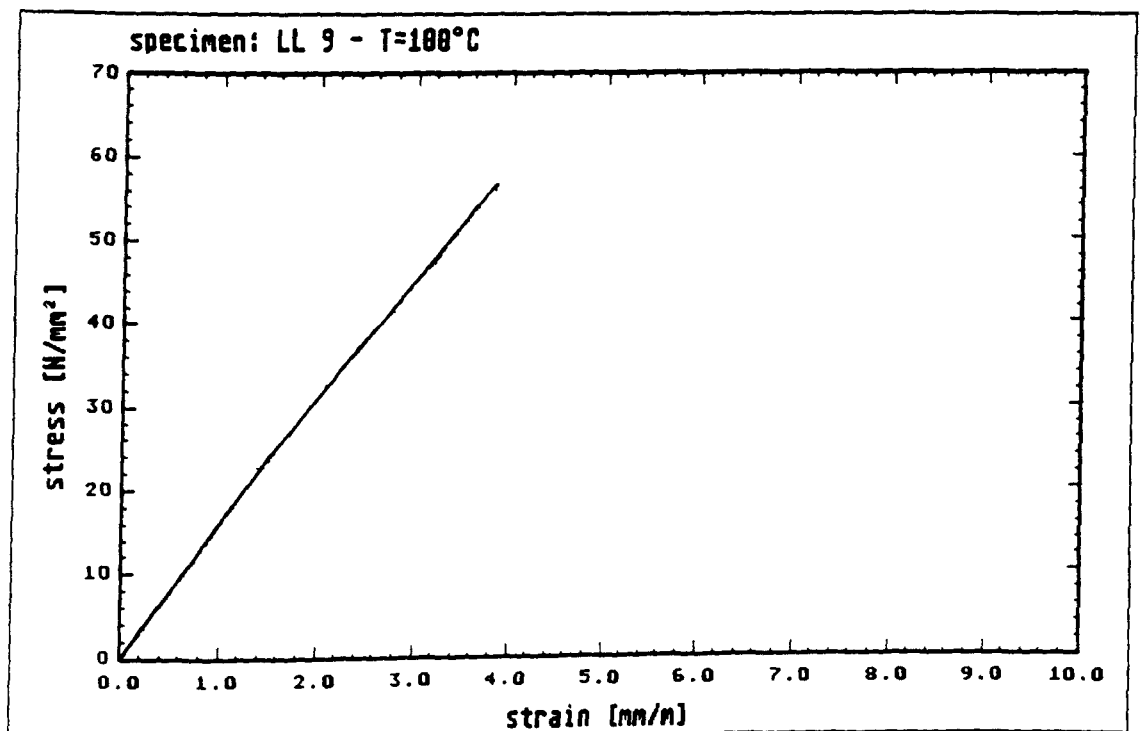


Bild 8: Bei 150 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 10

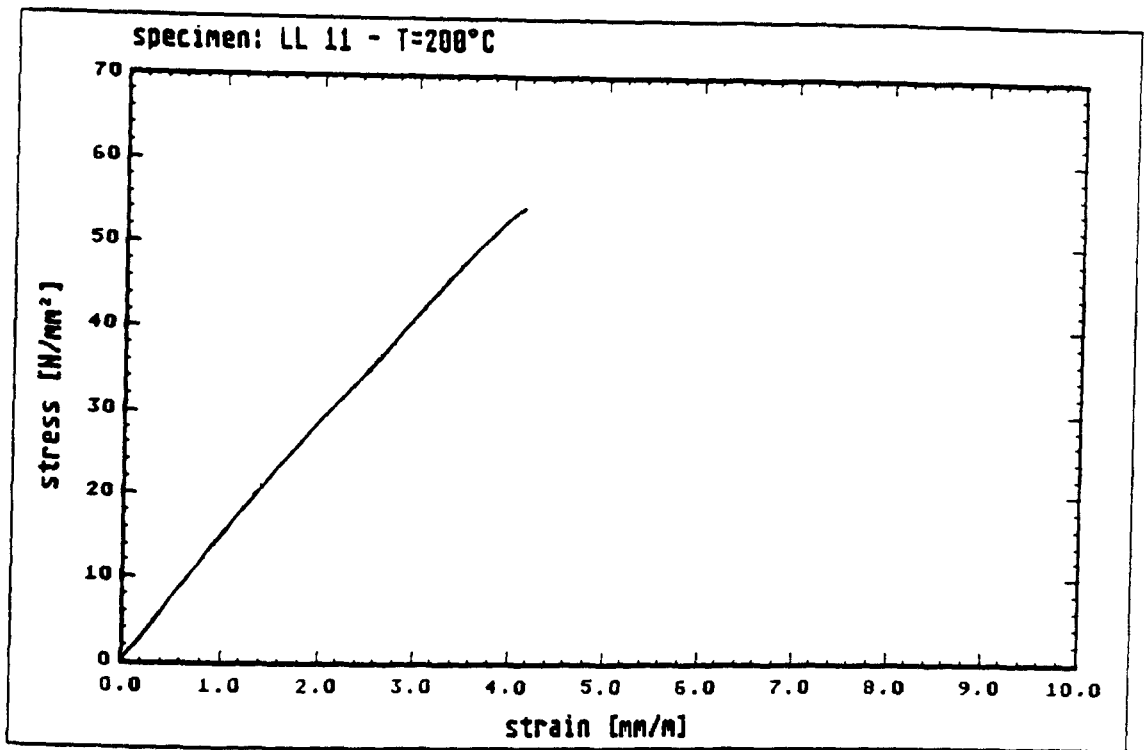


Bild 9: Bei 200 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 11

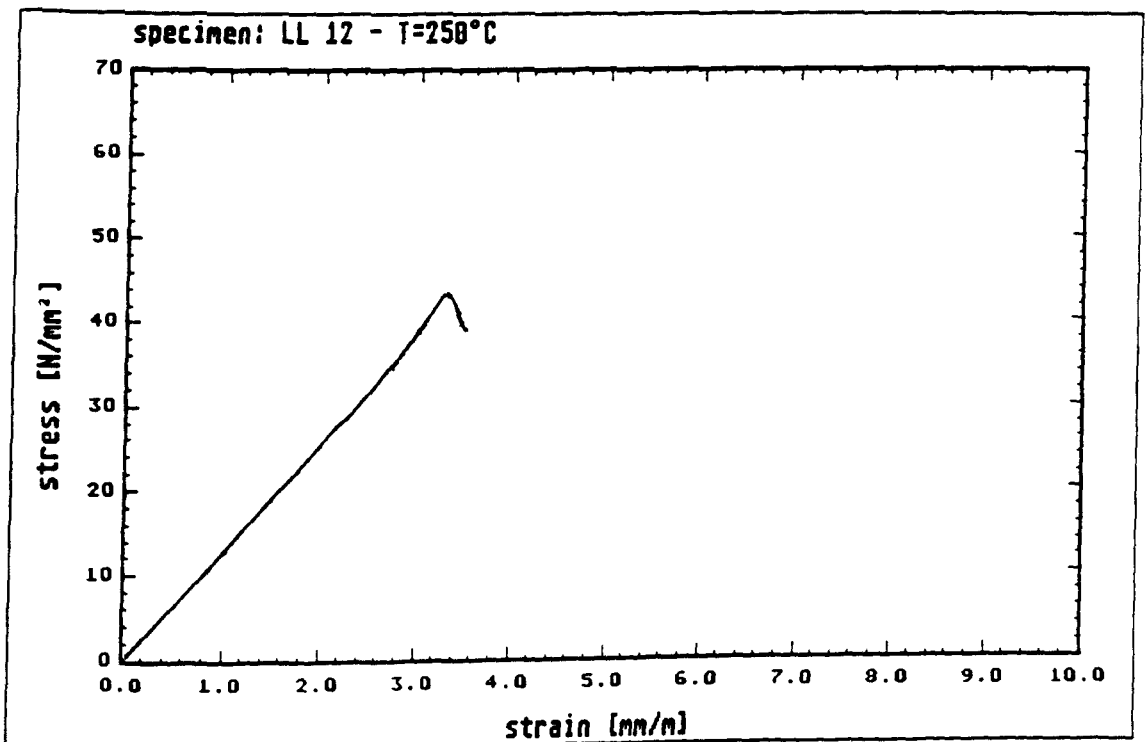


Bild 10: Bei 250 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 12

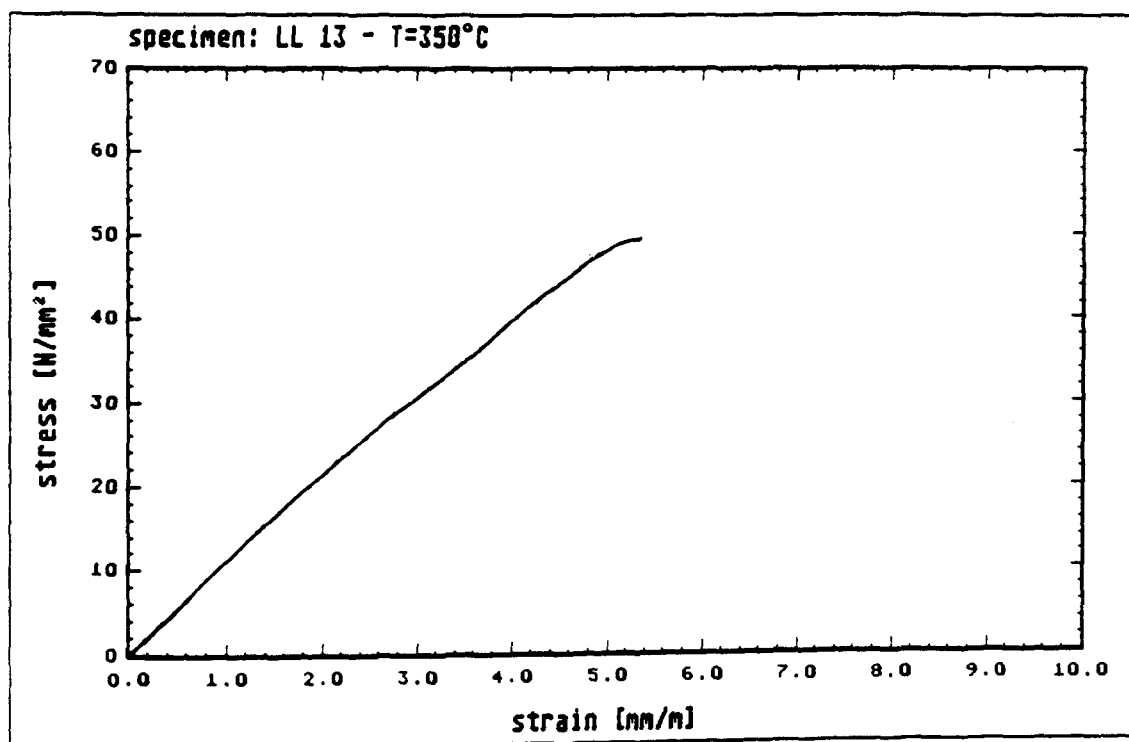


Bild 11: Bei 350 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 13

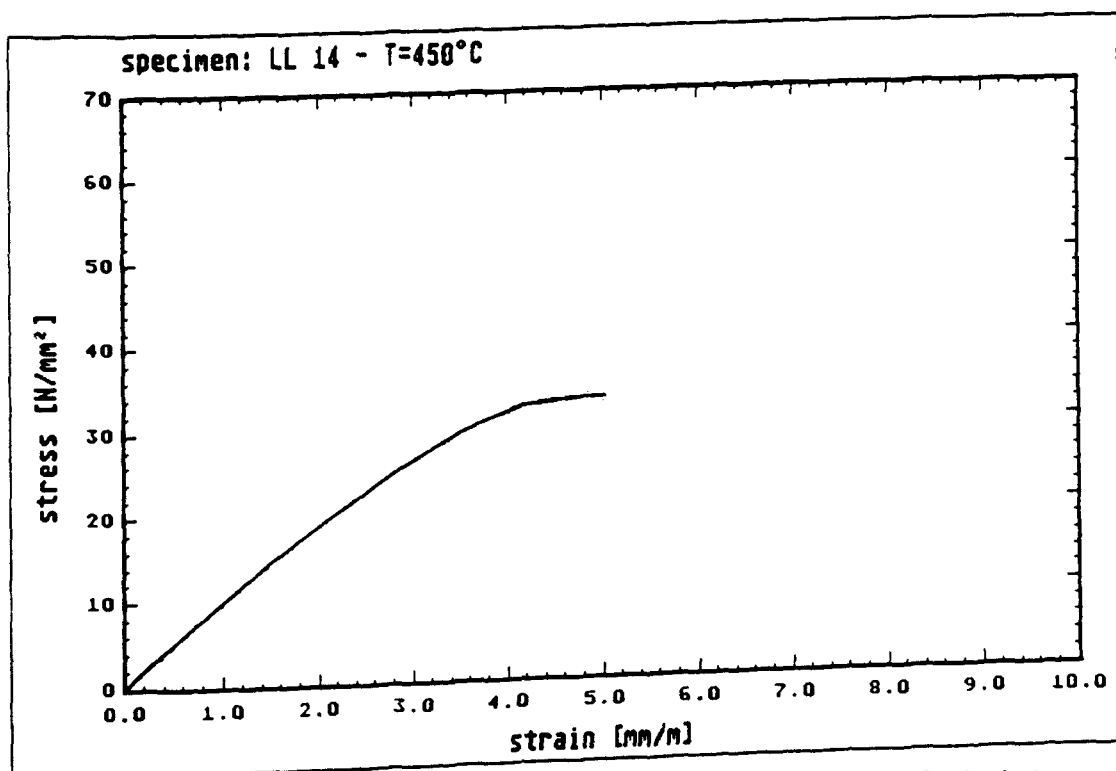


Bild 12: Bei 450 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 14

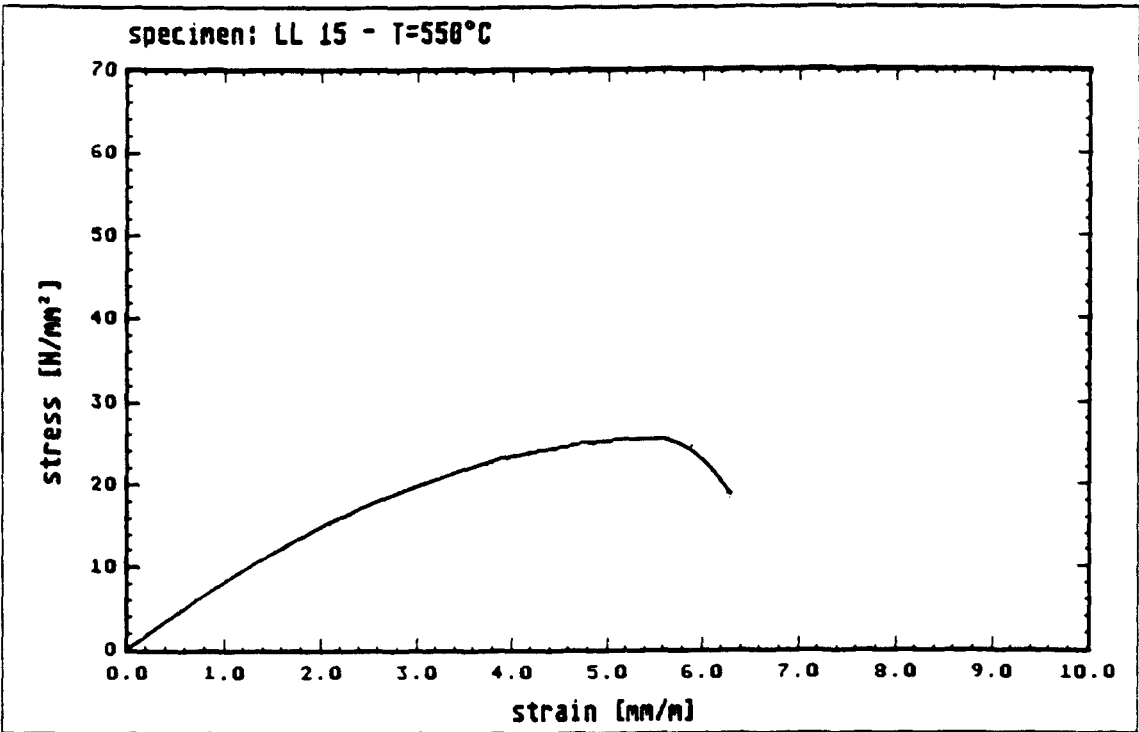


Bild 13: Bei 550 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 15

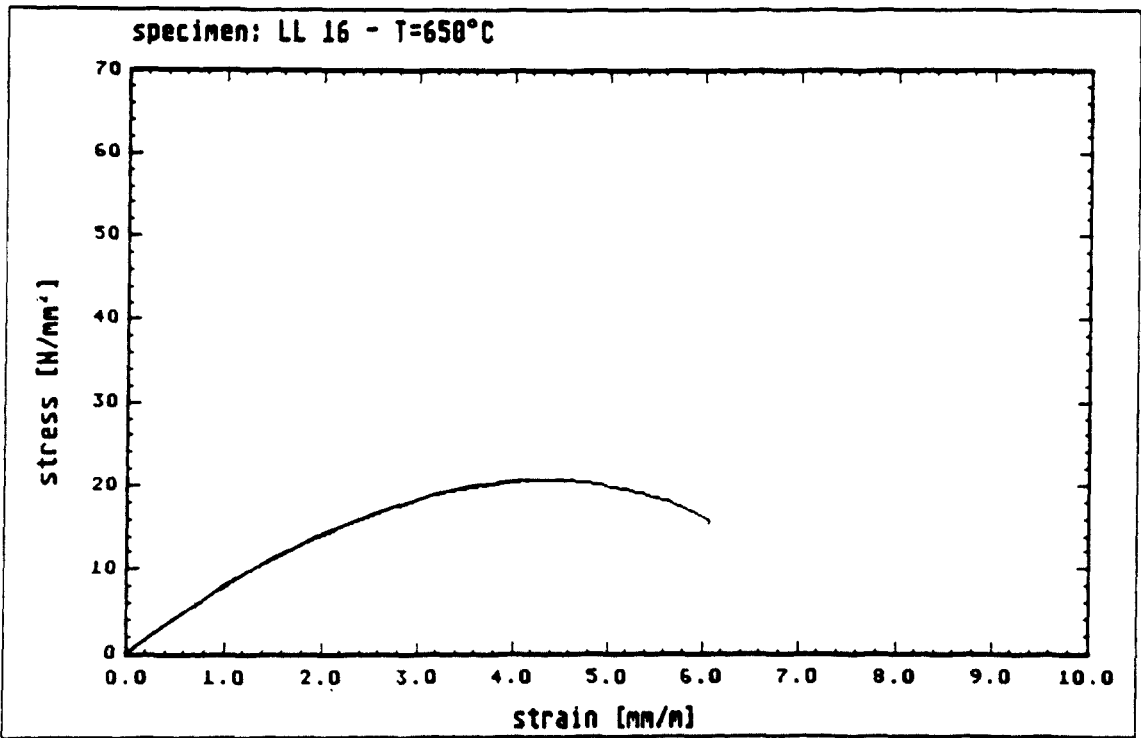


Bild 14: Bei 650 °C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 16

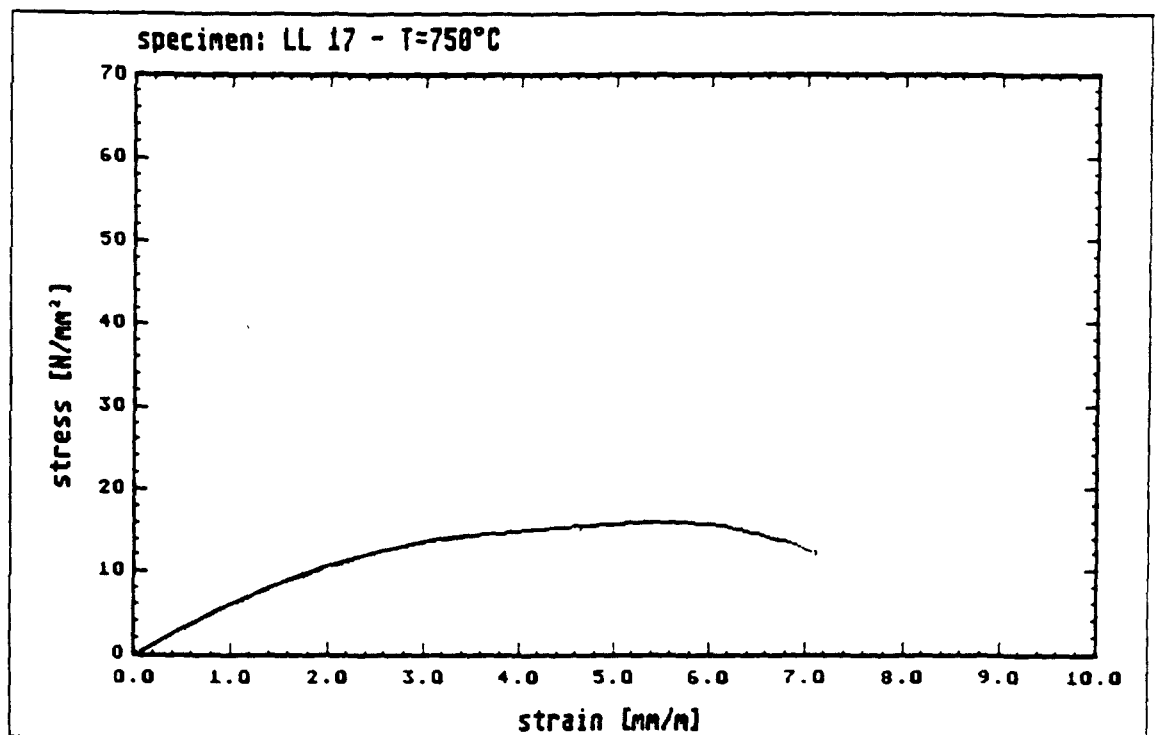


Bild 15: Bei 750°C ermittelte σ - ϵ -Beziehung des unbelastet aufgeheizten Probekörpers LL 17

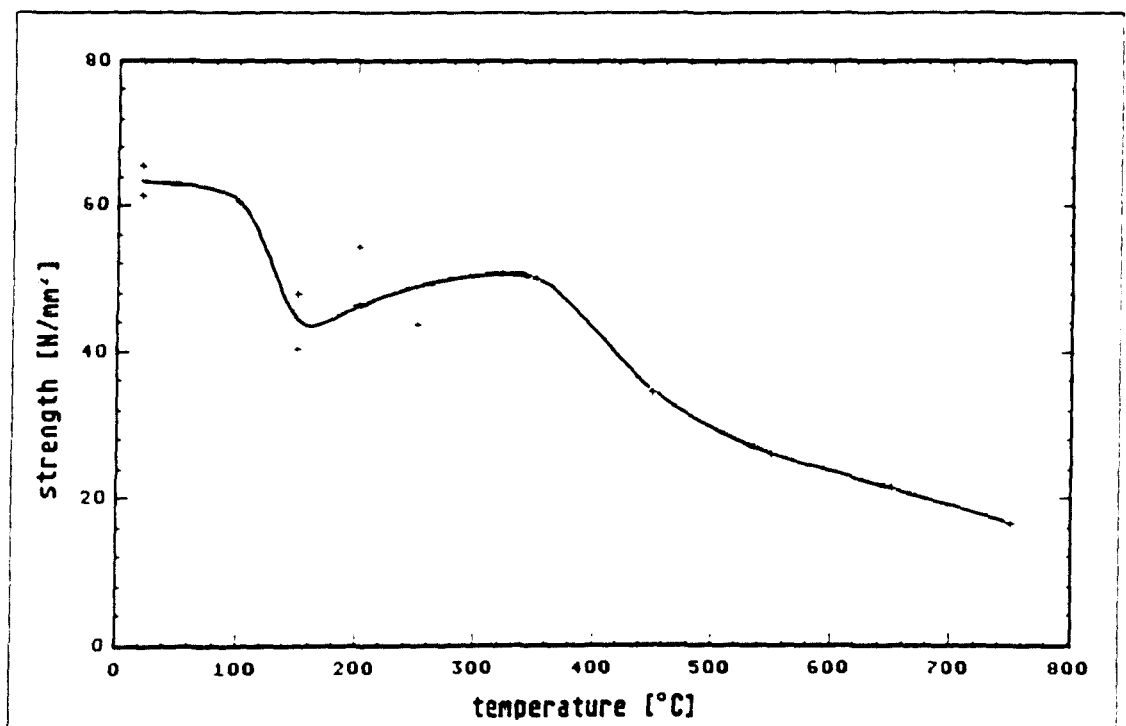


Bild 16: Festigkeit des hochfesten Leichtbetons in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur

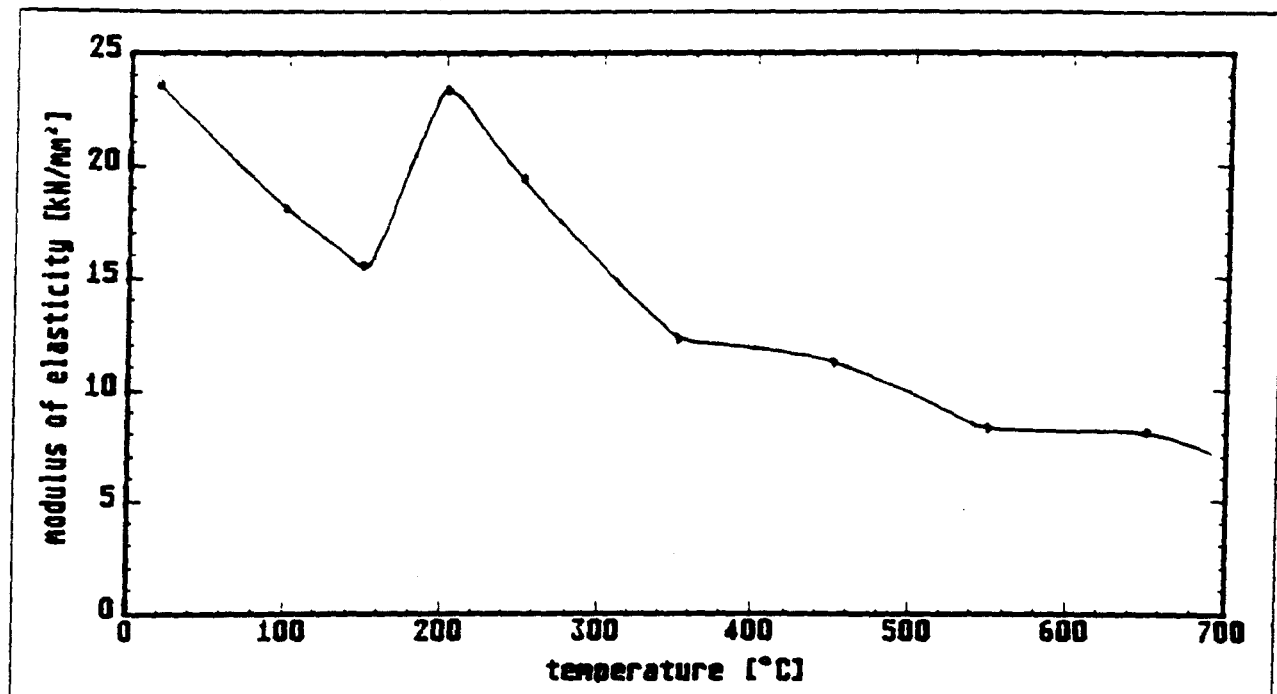


Bild 17: E-Modul des hochfesten Leichtbetons in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur



Bild 18: Mit $0,6 \times \sigma_{ult}$ (20 °C) belastet aufgeheizter Probekörper aus hochfestem Leichtbeton nach dem Versagen bei 153 °C.

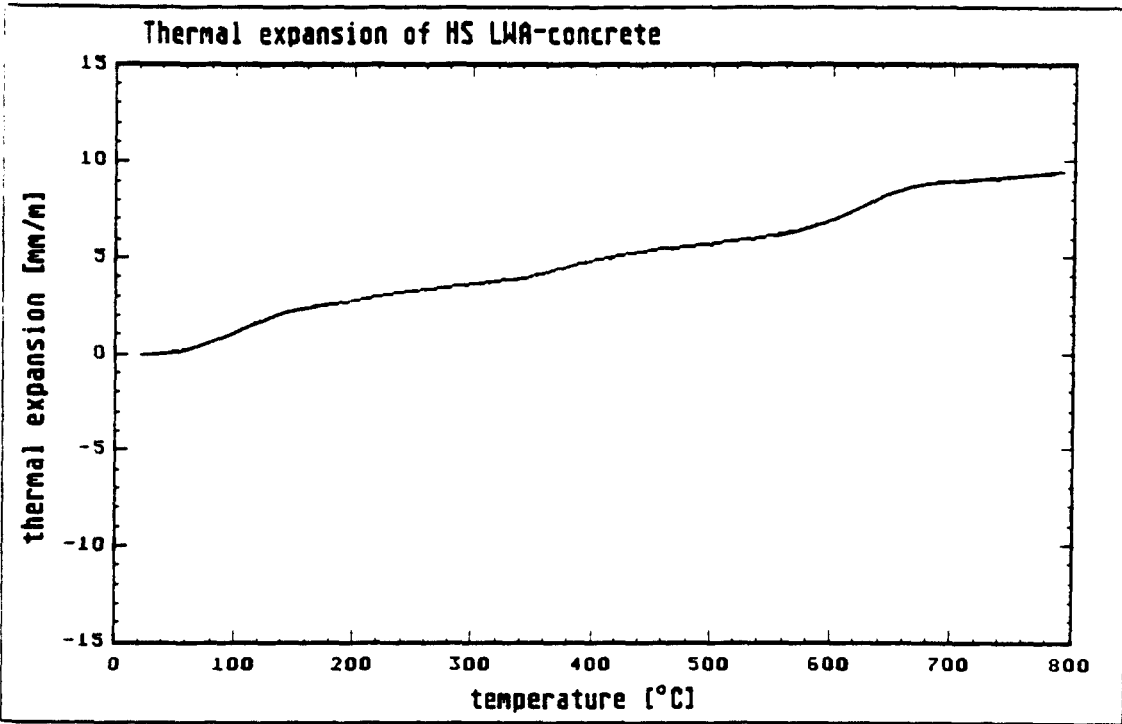


Bild 19: Thermische Ausdehnung des Probekörpers LL 17

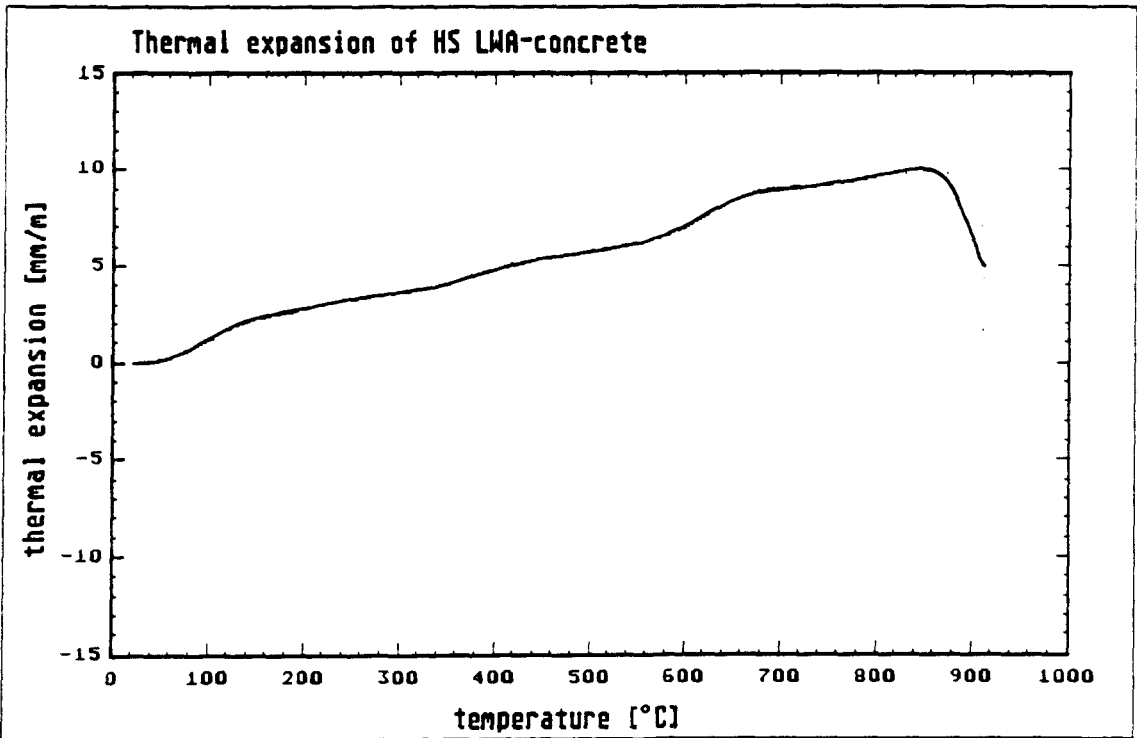


Bild 20: Thermische Ausdehnung des Probekörpers LL 28

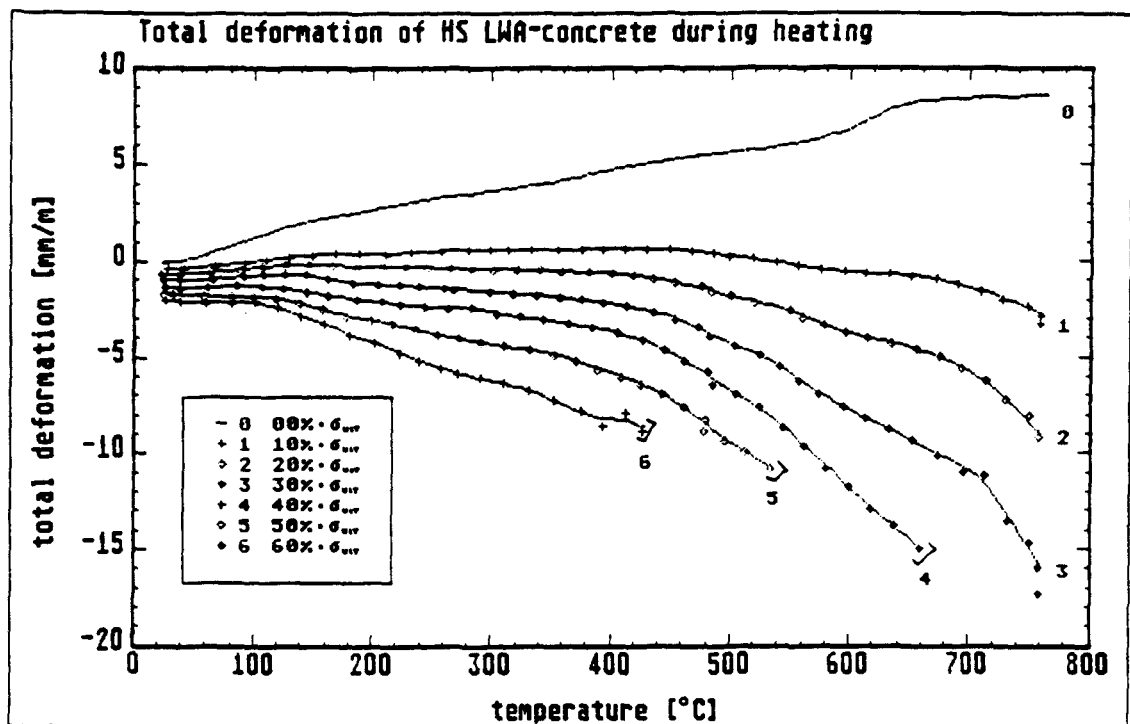


Bild 22: Transientes Kriechen von hochfestem Leichtbeton
 (3 = Probenbruch)

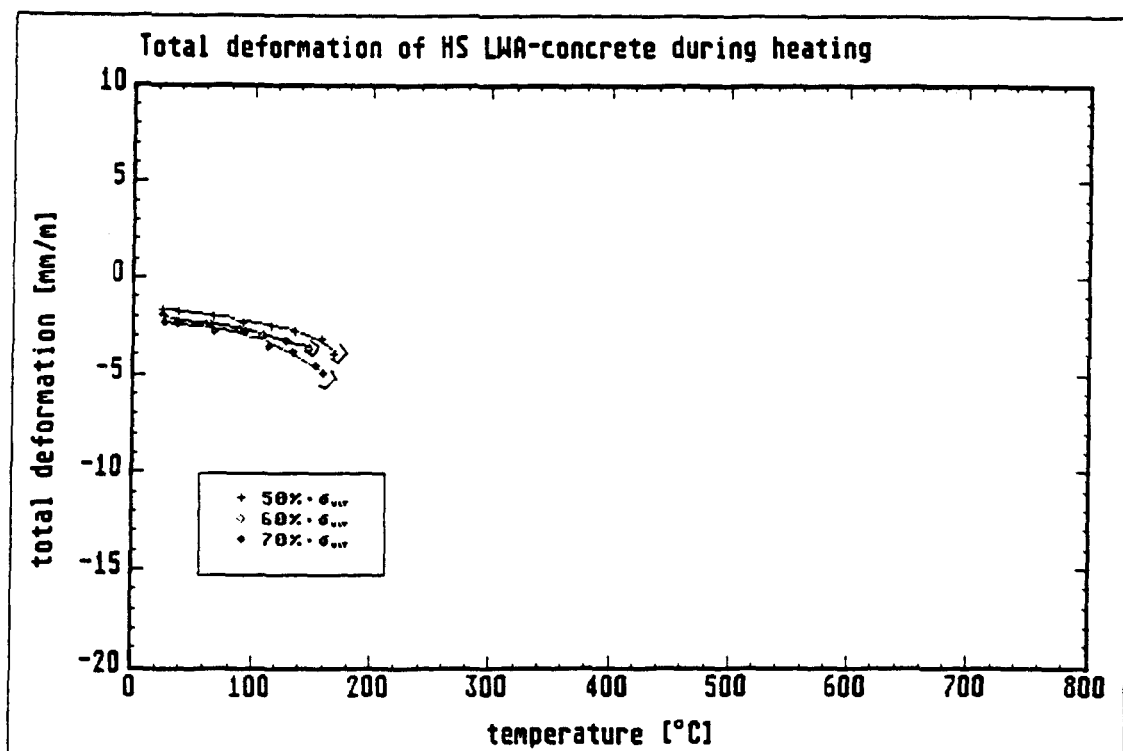


Bild 23: Transientes Kriechen von hochfestem Leichtbeton
 (3 = Probenbruch)

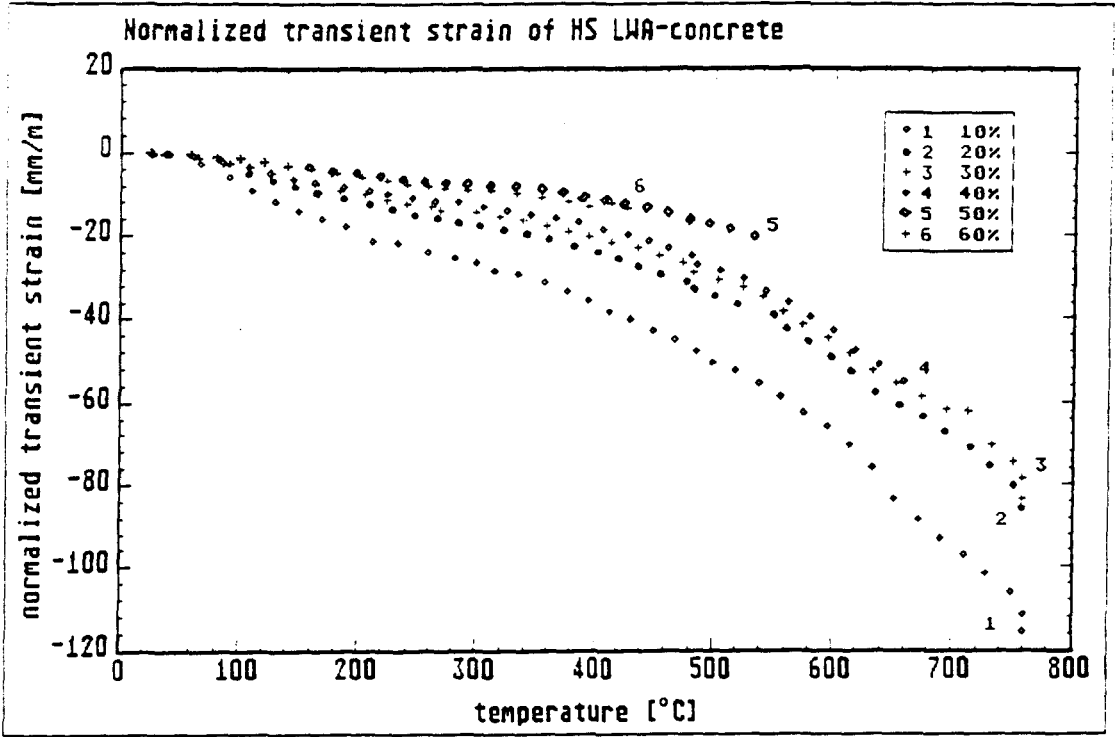


Bild 24: Bezogene transiente Kriechverformungen von hochfestem Leichtbeton

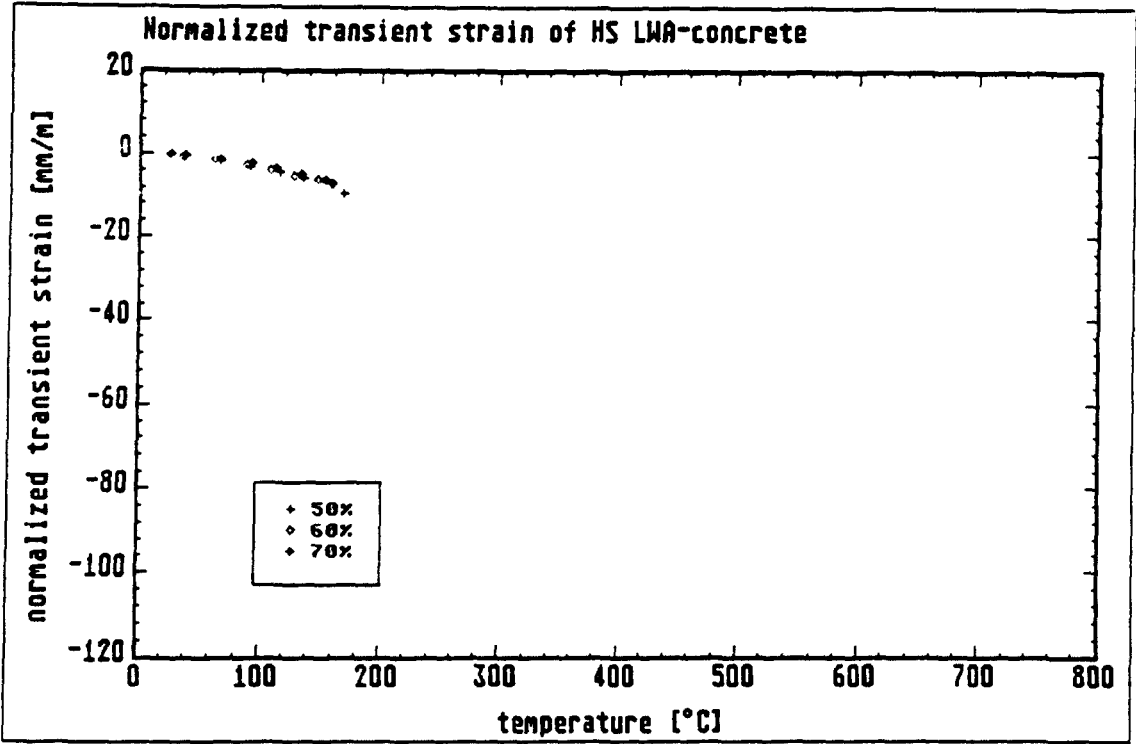


Bild 25: Bezogene transiente Kriechverformungen von hochfestem Leichtbeton

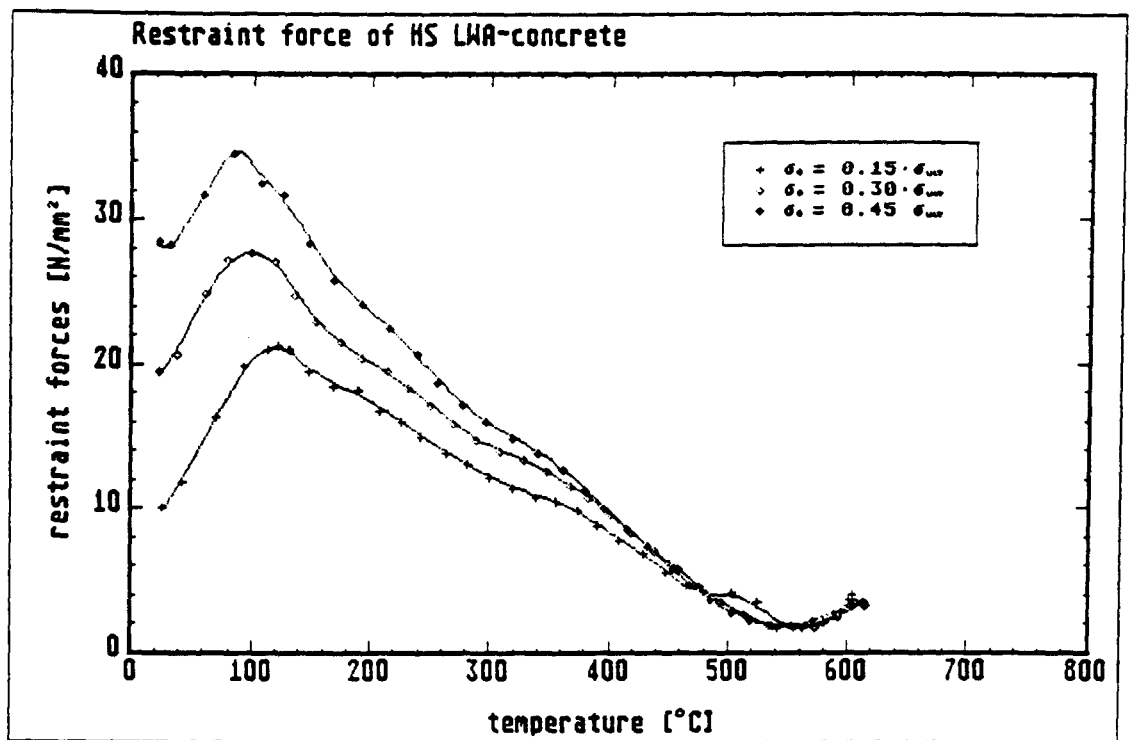


Bild 26: Zwangskraftverlauf während der Aufheizung von hochfestem Leichtbeton

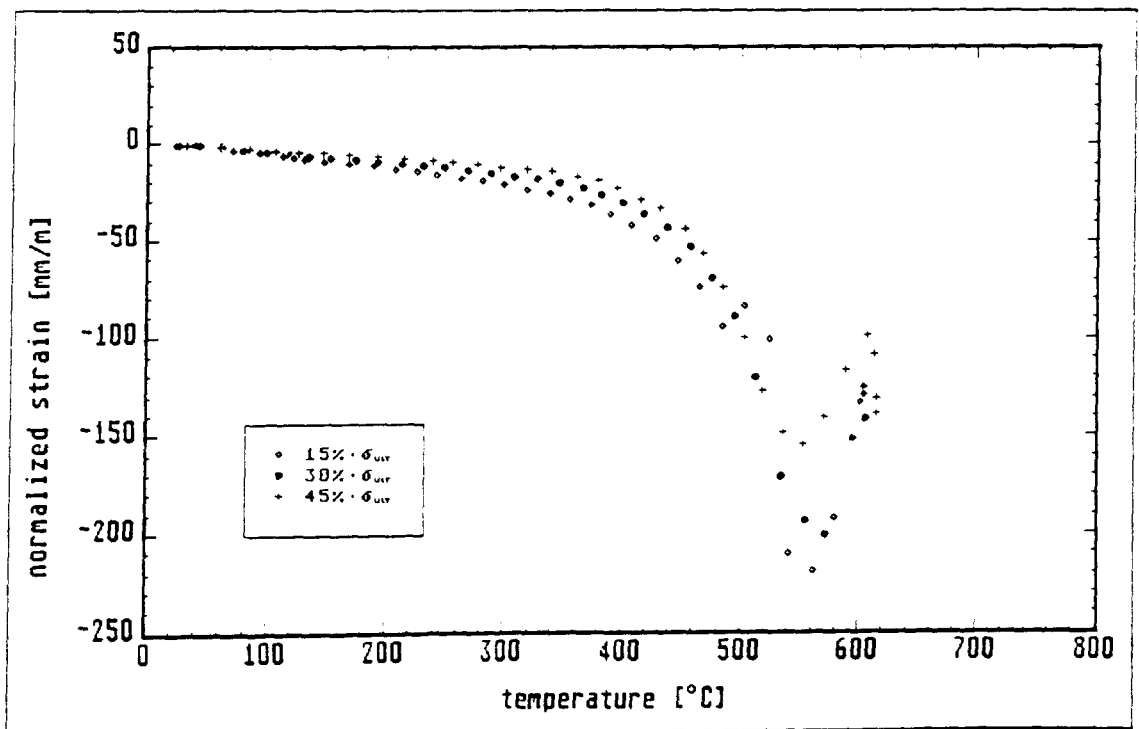


Bild 27: Aus den Zwangskraftverläufen berechnete bezogene transiente Kriechverformungen von hochfestem Leichtbeton

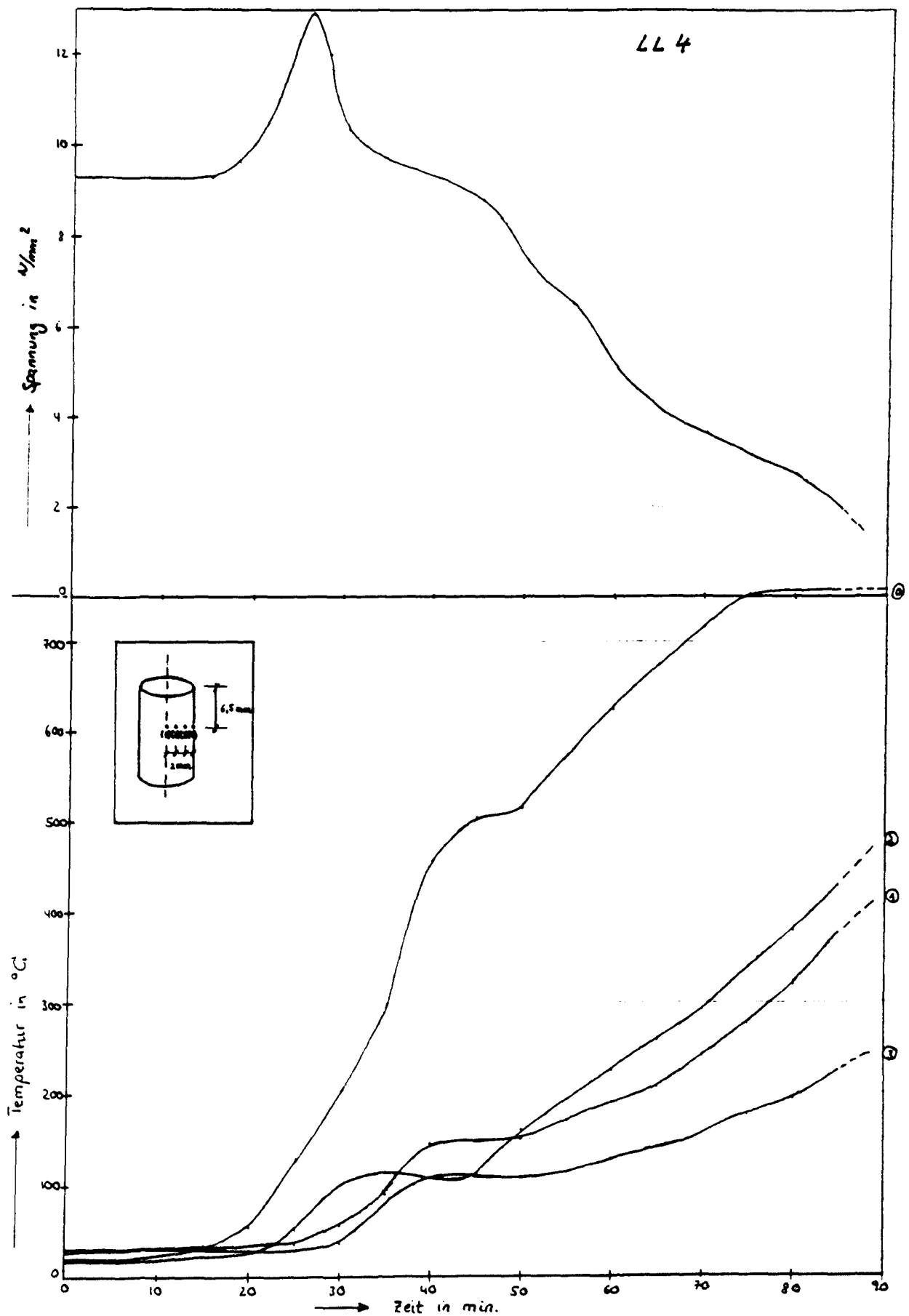


Bild 28: Zwangskraftentwicklung bei schneller Aufheizung von Proben (\varnothing 150 mm, l = 300 mm) aus hochfestem Leichtbeton; Probekörper LL 4, Anfangsbelastung: $0,15 \times \sigma_{ult}$ ($20^{\circ}C$)

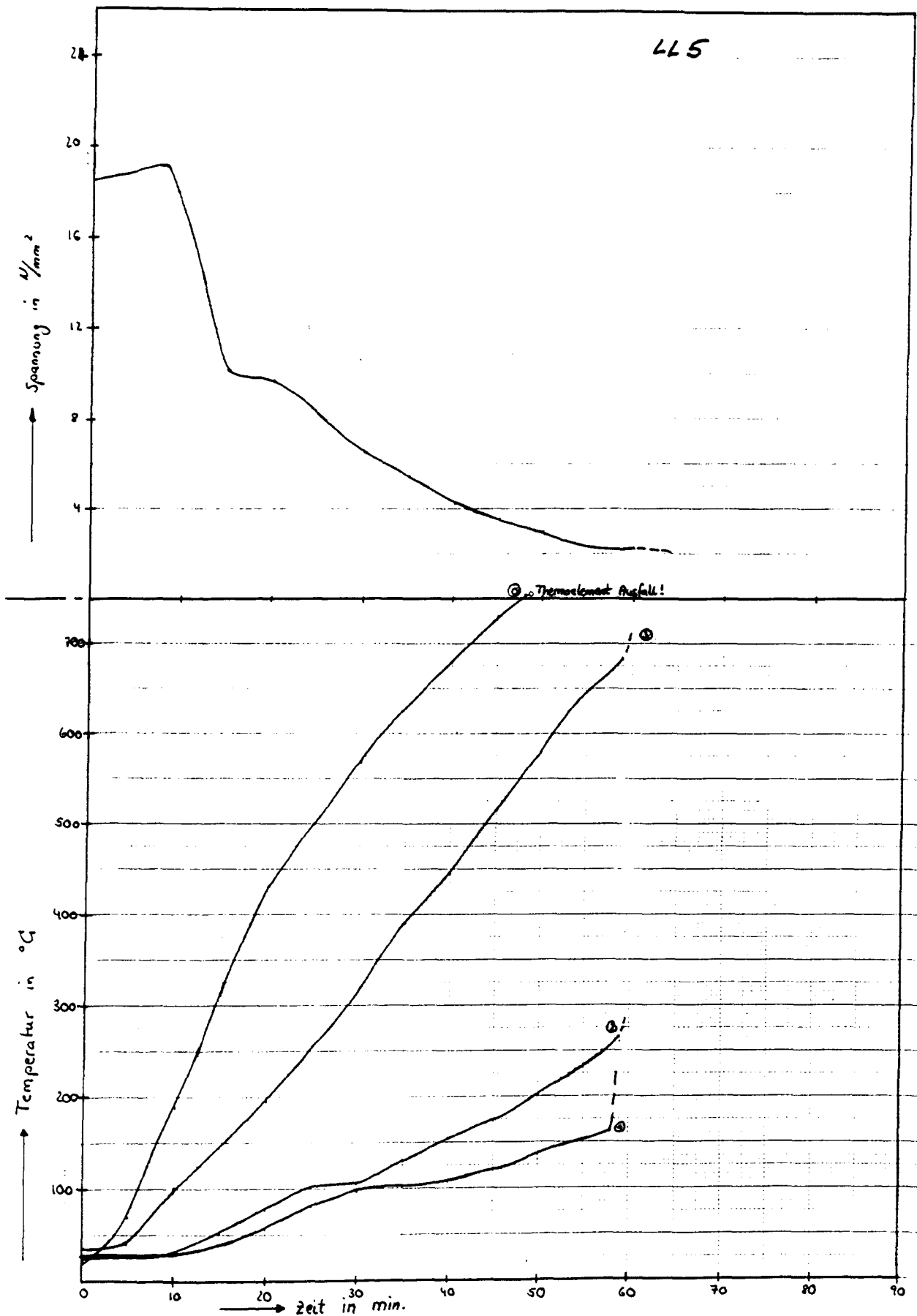


Bild 29: Zwangskraftentwicklung und Temperaturverlauf bei schneller Aufheizung von Proben (\varnothing 150 mm, l = 300 mm) aus hochfestem Leichtbeton; Probekörper LL 5, Anfangsbelastung: $0,3 \times \sigma_{ult}$ (20 $^{\circ}C$)

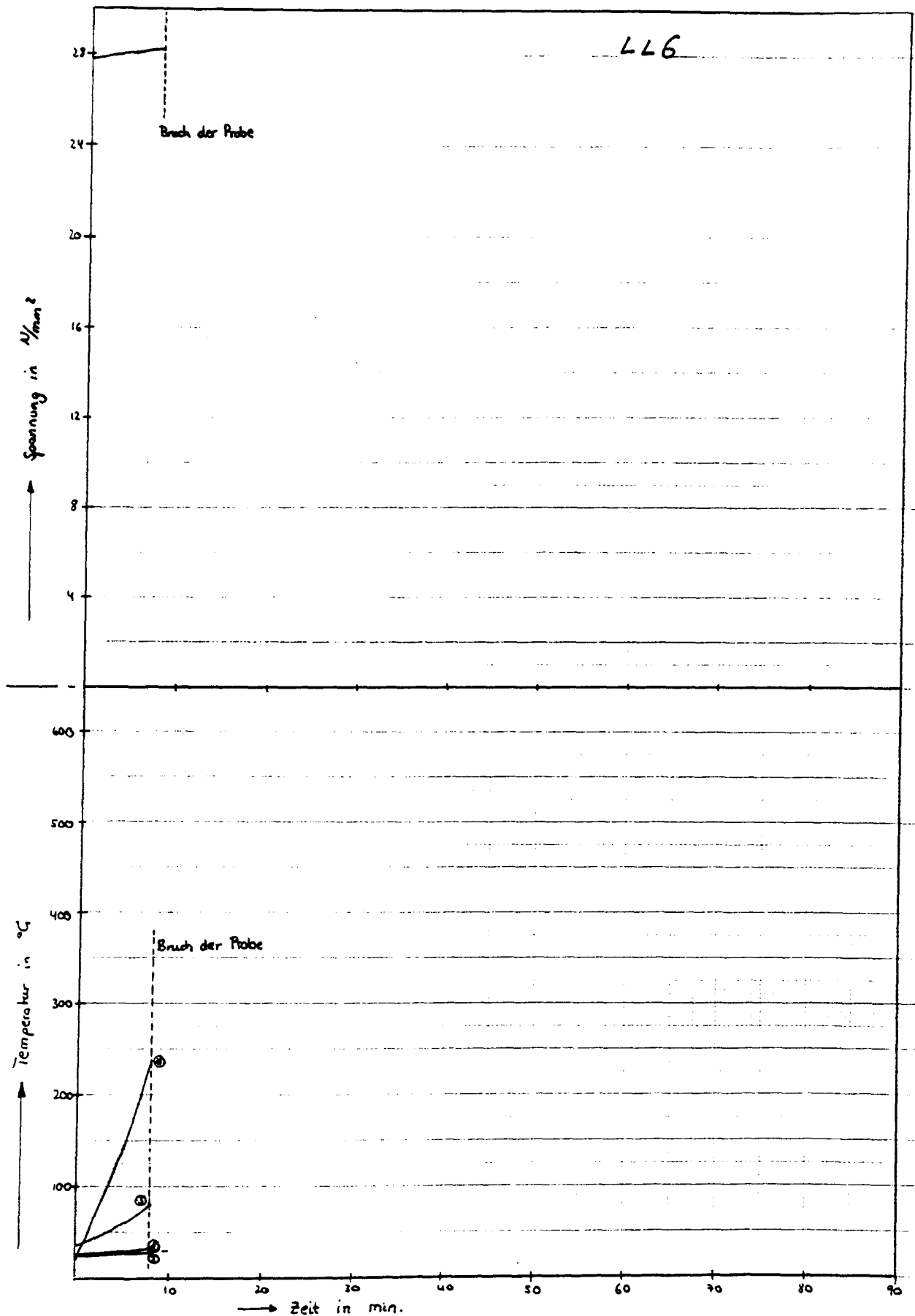


Bild 30: Zwangskraftentwicklung und Temperaturverlauf bei schneller Aufheizung von Proben (\varnothing 150 mm, l = 300 mm) aus hochfestem Leichtbeton; Probekörper LL 6, Anfangsbelastung: $0,45 \times \sigma_{ult}$ (20 $^{\circ}C$)